

Grado en Ingeniería eléctrica
(2018-2019)

Trabajo Fin de Grado

LÍNEA ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN DE 400kV: Cálculos técnicos y estudio del impacto ambiental

Alba López Béjar

Tutora: Hortensia Amaris Duarte

Fecha de presentación: 8 de Julio de 2019.

Lugar: 7.1.J03



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

RESUMEN

La presente Memoria hace referencia al estudio técnico y ambiental de la línea eléctrica de 400 kV que transcurre entre Villaviciosa de Odón y Morata. Esta línea forma parte del *anillo* de alta tensión que circunvala Madrid. La función de este conjunto de líneas y subestaciones es la de suministrar electricidad a dicha ciudad. Este abastecimiento se realiza a través de líneas radiales de 220 kV que conectan el *anillo* con los puntos de suministro.

El ámbito de estudio se centra en los municipios de Arroyomolinos y Móstoles, que son dos de las localidades por las que transcurre la línea de 400kV anteriormente mencionada. La elección de esta situación de estudio es debido al interés que existe en conocer el impacto que tiene la línea eléctrica a su paso por estos municipios.

El impacto social en estas zonas es notable debido a que la línea transcurre por zona urbana. Existe una gran preocupación social por vivir cerca de estos apoyos de alta tensión, debido a que los campos electromagnéticos están asociados con enfermedades como el cáncer. Por ello, los ayuntamientos de las localidades afectadas y de sus zonas colindantes están a la espera de la reubicación del trazado de la línea eléctrica.

El fin de esta memoria es estudiar los aspectos técnicos de la línea obteniendo sus especificaciones mecánicas y eléctricas para concluir qué implicaciones tiene la línea en las zonas de estudio. También se tiene como objetivo realizar el impacto ambiental y el impacto socio-económico en la población, el terreno, la fauna y la flora. Dos factores a tener en cuenta para realizar estos estudios son, por una parte, el alto crecimiento de población y el aumento de suelo urbano que se ha producido en esta zona en las últimas décadas. Y por otra, el paso del *Parque Regional curso medio río Guadarrama* en las proximidades de esta zona de estudio.

Por último, se propondrán modificaciones de este tramo de la línea que discurre por Arroyomolinos y Móstoles para que haya una mejor integración social y ambiental.

Palabras clave: Línea Eléctrica de Alta Tensión, impacto social, impacto ambiental

ABSTRACT

The current report describes the technical and environmental study of the 400kV power line that runs between Villaviciosa de Odón and Moraleja de Enmedio. This line belongs to the high voltage *ring* that surrounds Madrid. The aim of this set of lines and substations is to supply electricity to the capital city of this region. This power supply is made through 220 kV lines that connect the *ring* with the supply points.

The scope of this study focuses on the municipalities of Arroyomolinos and Móstoles, which are two of the towns through the above-mentioned 400kV line passes. The choice of this study location based on the interest to know the impact that the electric line has when it passes through these towns.

The social impact in these areas is remarkable due to the situation of the electric line because of the great rejection from the population that live near this type of lines. The councils of the affected towns and their adjoining areas are waiting for the relocation of the electric line layout.

The purpose of this report is to feature the technical aspects of the line by obtaining its mechanical and electrical specifications in order to establish the implications the line has in the study areas. Other objective of this report is to carry out the environmental impact by studying the effects it has on the population, ground, fauna and flora. Two factors to take into account are on the one hand, the high population growth and therefore the increase of the urban soil that has occurred in this area in recent decades and on the other, the route of *the Regional Park curso medio río Guadarrama* in the vicinity of this area.

Finally, some modifications of a section of the line that favour a better environmental integration and help to improve the technical specifications of the current one will be proposed.

Keywords: Transmission line, social factors, environmental factors.

A mis padres, por ser siempre mi gran apoyo.

A mi hermana, por ser siempre mi gran referente y un ejemplo a seguir.

*A 'vos' y a 'las chicas', por el placer de haberos conocido en este camino y que
hayáis pasado a ser parte de mi vida.*

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Motivación del trabajo.....	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Estado de la cuestión	2
1.4. Marco Regulador.....	3
1.5. Estructura del documento.....	3
Capítulo 2. Características de la línea, del conductor y los apoyos.....	5
2.1. Trazado de la línea y situación de los apoyos	5
2.2. Características de la línea	7
2.3. Características del conductor	7
2.4. Características del apoyo	8
2.5. Cantones.....	8
2.6. Vanos.....	9
2.7. Vanos ideales de regulación.....	10
Capítulo 3. Cálculos mecánicos.....	11
3.1. Hipótesis de sobrecarga.....	11
3.1.1. Tracción máxima viento	11
3.1.2. Tracción máxima hielo	12
3.1.3. Tracción máxima viento y hielo	13
3.2. Hipótesis de tracción máxima.....	14
3.3. Hipótesis de flechas máximas	14
3.4. Comprobación de fenómenos vibratorios	18
3.5. Tabla de tendido.....	22
3.5.1. Tabla de tendido. Tracción [daN/mm ²]	22
3.5.2. Tabla de tendido. Flecha [m].....	23
3.6. Distancias de seguridad	24
Capítulo 4. Cálculos eléctricos.....	27
4.1. Circuito equivalente.....	27
4.1.1. Intensidad nominal.....	27
4.1.2. Resistencia y efecto Kelvin o pelicular	27
4.1.3. Inductancia y capacidad de una línea trifásica	29
4.2. Modelo de línea: A, B, C y D del cuadripolo equivalente.	32

4.3. Intensidad máxima admisible	33
4.3.1. Cálculo de la intensidad máxima admisible a través de la densidad de corriente	33
4.3.2. Cálculo de la intensidad máxima admisible a través del balance térmico...	34
4.4. Caída de tensión.	35
4.5. Pérdidas de potencia.....	36
4.5.1. Efecto Joule	36
4.5.2. Efecto Corona.....	37
Capítulo 5. Impacto ambiental	39
5.1. Recopilación de información sobre la zona de estudio	39
5.1.1. Estudio demográfico	39
5.1.2. Estudio urbanístico	40
5.1.3. Estudio paisajístico	42
5.1.4. Estudio de la flora y fauna.....	43
5.1.5. Estudio de los campos electromagnéticos de una línea eléctrica.	44
Capítulo 6. Impacto socio-económico y modificaciones de la línea	45
6.1. Impacto medioambiental	45
6.2. Impacto social y económico.....	45
6.3. Modificaciones.....	46
6.3.1. Modificación 1	46
6.3.2. Modificación 2.....	47
Capítulo 7. Presupuesto	49
7.1. Recursos humanos	49
7.2. Recursos materiales.....	49
7.3. Presupuesto final.....	49
Capítulo 8. Conclusiones y posibles estudios futuros.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Apoyo de la LE Villaviciosa de Odón - Moraleja de Enmedio	2
Ilustración 2. Situación de los apoyos. Móstoles. [22]	5
Ilustración 3. Situación de los apoyos. Arroyomolinos. [21]	6
Ilustración 4. Dimensiones del apoyo [5]	8
Ilustración 5. Peso aparente del conductor. Sobrecarga de viento	12
Ilustración 6. Peso aparente del conductor. Sobrecarga de hielo	12
Ilustración 7. Peso aparente del conductor. Sobrecarga de hielo y viento	13
Ilustración 8. Amortiguador [7]	21
Ilustración 9. Distancias entre fases	29
Ilustración 10. Separador [7]	30
Ilustración 11. Circuito equivalente	32
Ilustración 12. Densidad máxima de corriente	33
Ilustración 13. f.d.p frente a caída de tensión	36
Ilustración 14. f.d.p frente a pérdidas de potencia por efecto Joule	36
Ilustración 15. Relación de las tensiones por efecto corona	38
Ilustración 16. Evolución de la población empadronada en Arroyomolinos [9]	39
Ilustración 17. Pirámide de población de Arroyomolinos[10]	40
Ilustración 18. Planteamiento urbanístico. Visor SIT [12]	41
Ilustración 19. Espacios naturales protegidos. Visor SIT [12]	42
Ilustración 20. Uso agrario del terreno. Visor SIT [12]	43
Ilustración 21. Campos electromagnéticos en el organismo [16]	44
Ilustración 22. Circuito equivalente línea subterránea	46
Ilustración 23. Modificación de la línea. Visor SIT [12]	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de la línea.....	7
Tabla 2. Dimensiones del apoyo [5].....	8
Tabla 3. Cantones	8
Tabla 4. Longitud de los vanos	9
Tabla 5. Vanos ideales de regulación.	10
Tabla 6. Tracción máxima admisible.....	11
Tabla 7. Resultados de las tracciones máximas admisibles.....	14
Tabla 8. Flechas máximas	15
Tabla 9. Hipótesis de flechas máximas. Cantón A	16
Tabla 10. Hipótesis de flechas máximas. Cantón B	16
Tabla 11. Hipótesis de flechas máximas. Cantón C	16
Tabla 12. Hipótesis de flechas máximas. Cantón D	16
Tabla 13. Hipótesis de flechas máximas. Cantón E	17
Tabla 14. Hipótesis de flechas máximas. Cantón F	17
Tabla 15. Hipótesis de flechas máximas. Cantón G	17
Tabla 16. Hipótesis de flechas máximas. Cantón H	17
Tabla 17. Hipótesis de flechas máximas. Cantón I.....	17
Tabla 18. Hipótesis de flechas máximas. Cantón J.....	18
Tabla 19. Fenómenos vibratorios.....	18
Tabla 20. Fenómenos vibratorios. Cantón A	19
Tabla 21. Fenómenos vibratorios. Cantón B	19
Tabla 22. Fenómenos vibratorios. Cantón C	19
Tabla 23. Fenómenos vibratorios. Cantón D	19
Tabla 24. Fenómenos vibratorios. Cantón E	20
Tabla 25. Fenómenos vibratorios. Cantón F	20
Tabla 26. Fenómenos vibratorios. Cantón G.....	20
Tabla 27. Fenómenos vibratorios. Cantón H.....	20
Tabla 28. Fenómenos vibratorios. Cantón I	21
Tabla 29. Características del amortiguador [7].....	21
Tabla 30. Fenómenos vibratorios. Cantón J.....	21
Tabla 31. Tabla de tendido. Tracción.....	22
Tabla 32. Tabla de tendido. Flecha.....	24
Tabla 33. Distancia de seguridad. Cantón A	25
Tabla 34. Distancia de seguridad. Cantón B	25
Tabla 35. Distancia de seguridad. Cantón C	25
Tabla 36. Distancia de seguridad. Cantón D.....	26
Tabla 37. Distancia de seguridad. Cantón E	26
Tabla 38. Distancia de seguridad. Cantón F	26
Tabla 39. Distancia de seguridad. Cantón G.....	26
Tabla 40. Distancia de seguridad. Cantón H.....	26
Tabla 41. Distancia de seguridad. Cantón I	26
Tabla 42. Distancia de seguridad. Cantón J.....	26
Tabla 43. Resistencia de la línea y efecto pelicular.....	28
Tabla 44. Características del separador [7].....	30
Tabla 45. Balance térmico	35

Tabla 46. Modificaciones	46
Tabla 47. Presupuesto. Recursos humanos.	49
Tabla 48. Presupuesto. Recursos materiales	49
Tabla 49. Presupuesto final	49

LISTA DE ABREVIATURAS

LE	Línea Eléctrica
f.d.p	Factor de potencia
RLAT	Reglamento de Líneas Eléctricas de Alta Tensión
ITC	Instrucción Técnica Complementaria
UC3M	Universidad Carlos III de Madrid
SIT	Sistema de Información Territorial
PGOU	Plan General de Ordenación Urbana
ZEC	Zona Especial de Conservación
REE	Red Eléctrica de España
BOE	Boletín Oficial del Estado
BOCM	Boletín Oficial de la Comunidad de Madrid
OMS	Organización Mundial de la Salud
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation
AEEIA	Asociación Española de Evaluación de Impacto Ambiental

Capítulo 1. Introducción

1.1.Motivación del trabajo

Esta memoria se centra en la zona suroeste de Madrid donde se encuentran dos líneas de alta tensión de 400kV. Por una parte, la línea eléctrica de Galapagar-Moraleja de Enmedio, por otra parte, se encuentra la línea eléctrica de Villaviciosa de Odón - Morata, que será en la que se centrará este estudio.

El objeto de este Trabajo Fin de Grado es el estudio técnico y ambiental de la línea eléctrica de alta tensión Villaviciosa de Odón - Morata en los municipios de Arroyomolinos y Móstoles.

Esta línea eléctrica forma parte de lo que se conoce como el *Anillo de Madrid*, se trata de un conjunto de líneas y subestaciones que circunvalan el centro de la comunidad abasteciendo así a la capital a través de líneas radiales de 220 kV.

El estudio principal de la línea se hará en el municipio de Arroyomolinos y en la urbanización Parque Coimbra perteneciente a la ciudad de Móstoles. Se han elegido estas localizaciones para realizar la investigación del impacto de la línea debido a que transcurre por zona residencial y por zonas protegidas como el *Parque Regional del curso medio del río Guadarrama y su entorno*.

El tramo de estudio de la línea comienza en Móstoles, bordeándolo hasta llegar al centro comercial Xanadú, cruzando en este tramo la autovía A5 en el kilómetro 23. Por último, llega a Arroyomolinos, atravesando esta localidad de un extremo al otro.

1.2.Objetivos

Tras tener reuniones con distintos municipios afectados por estas líneas eléctricas, el Ayuntamiento de Arroyomolinos expresó su interés por realizar las modificaciones necesarias para desviar el trayecto de las dos líneas de alta tensión que transcurren por su localidad (LE de Galapagar-Moraleja de Enmedio y LE de Villaviciosa de Odón-Moraleja de Enmedio).

Ambas modificaciones se encuentran actualmente paradas sin conocimiento de la fecha de su realización, sin embargo, existe un plan más desarrollado para la modificación de la línea Galapagar - Moraleja de Enmedio. Por eso, se vio como una oportunidad enfocar esta memoria en la realización de los estudios técnicos y ambientales sobre la línea Villaviciosa de Odón - Morata y así conocer las implicaciones y riesgos que tiene la misma sobre la zona de estudio. Una vez obtenidos los resultados se realizará un análisis de las posibles modificaciones que puede sufrir la línea para disminuir el impacto social y ambiental que tiene actualmente.

1.3.Estado de la cuestión

En las últimas décadas ha habido un aumento de población y de construcción de nueva vivienda en las localizaciones por las que transcurre la línea, encontrándose los apoyos a pocos metros de las viviendas.

Los ayuntamientos de Arroyomolinos, Móstoles y Moraleja de Enmedio expusieron a REE la necesidad de alejar ambas líneas de estas zonas críticas. En el BOE núm. 174 [1] se formula el impacto ambiental y el estudio de la modificación de ambas líneas. Actualizado este documento en el BOE núm. 176 [2] y en el BOE núm. 98 [3].

Actualmente las modificaciones de ambas líneas se encuentran pausadas hasta el cumplimiento de varios requisitos legales para comenzar las obras.

En la Ilustración 1 se ve uno de los apoyos de la línea a su paso por Arroyomolinos.



Ilustración 1. Apoyo de la LE Villaviciosa de Odón - Moraleja de Enmedio

1.4.Marco Regulator.

El reglamento necesario para este tipo de proyectos viene especificado en los siguientes documentos:

Real Decreto 223/2008, (RLAT) Reglamento Técnico de Líneas Eléctricas de Alta Tensión.

- *ITC-LAT 07*, Líneas aéreas con conductores desnudos
- *ITC-LAT 06*, Líneas subterráneas con cables aislados

UNE 21018, características de los conductores compuestos de aleación de aluminio reforzado de acero recubierto de aluminio.

Ley 21/2013, Ley de evaluación ambiental.

Real Decreto Legislativo 1/2008, ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos

Ley 20/1999, del Parque Regional del Curso Medio del río Guadarrama

Decreto 105/2014, declaración de zona especial de conservación y plan de gestión

Real Decreto Legislativo 7/2015, Ley de suelo y rehabilitación urbana.

P.G.O.U, Plan General de Ordenación Urbana de Madrid

BOE núm. 174, lunes 20 de julio de 2009. Declaración de impacto ambiental del proyecto de modificación de la LE 400kV Galapagar-Moraleja de Enmedio y de la LE a 400kV Villaviciosa-Moraleja de Enmedio

BOE núm. 176, martes 24 de julio de 2012. Evaluación de impacto ambiental de la modificación de la línea a 400kV Galapagar-Moraleja de Enmedio entre los apoyos 456 y 569.

BOE núm. 98, viernes 24 de abril de 2015. Declaración de impacto ambiental de la línea a 400kV Galapagar-Moraleja de Enmedio.

BOCM núm. 160, miércoles 8 de julio de 2009. Impacto ambiental de la línea eléctrica a 400kV, doble circuito, de la línea Morata-Villaviciosa.

1.5.Estructura del documento

La memoria está dividida en 8 capítulos, cada uno de ellos se encuentra descrito a continuación:

En el *Capítulo 1* se presenta la introducción de la memoria dentro de la cual se desarrolla la motivación del trabajo, los objetivos, el estado de la cuestión y el marco regulador.

Dentro del *Capítulo 2* se encuentran las características de la línea, del conductor y los apoyos. Además, se nombran los cantones en los que se separa la línea y las distancias de los vanos.

Seguidamente, en el *Capítulo 3*, se realizan los cálculos mecánicos de la línea donde se estudian los casos de hipótesis de sobrecarga, hipótesis de tracción máxima, hipótesis de flechas máximas y las tablas de tendido a diferentes temperaturas. Por último, se calculan y se comprueban las distancias de seguridad.

En el *Capítulo 4* se llevan a cabo los cálculos eléctricos de la línea donde se obtiene el circuito equivalente y se comprueban que la intensidad máxima está por encima de los valores nominales. También se verifica que los valores de caída de tensión y de pérdidas de potencia se encuentran dentro de unos valores aceptables.

El estudio de impacto ambiental está dentro del *Capítulo 5*, donde se recopila información sobre demografía, planteamiento urbanístico, paisaje, fauna y flora y campos electromagnéticos.

Una vez realizados los estudios anteriores, en el *Capítulo 6* se estudian qué impactos existen en los valores patrimoniales y cuál es el impacto socio-económico. Posteriormente, se plantean dos tipos de modificaciones que se pueden llevar a cabo para disminuir el impacto ambiental existente debido a la localización de la línea eléctrica actual.

En el *Capítulo 7* se presenta el presupuesto tanto de los recursos humanos como los materiales necesarios para realizar esta memoria.

Por último, en el *Capítulo 8* se explican las conclusiones y los trabajos futuros.

Capítulo 2. Características de la línea, del conductor y los apoyos

2.1. Trazado de la línea y situación de los apoyos

En la Ilustración 2 e Ilustración 3 se han localizado los apoyos y se han situado en los mapas de Móstoles y Arroyomolinos.

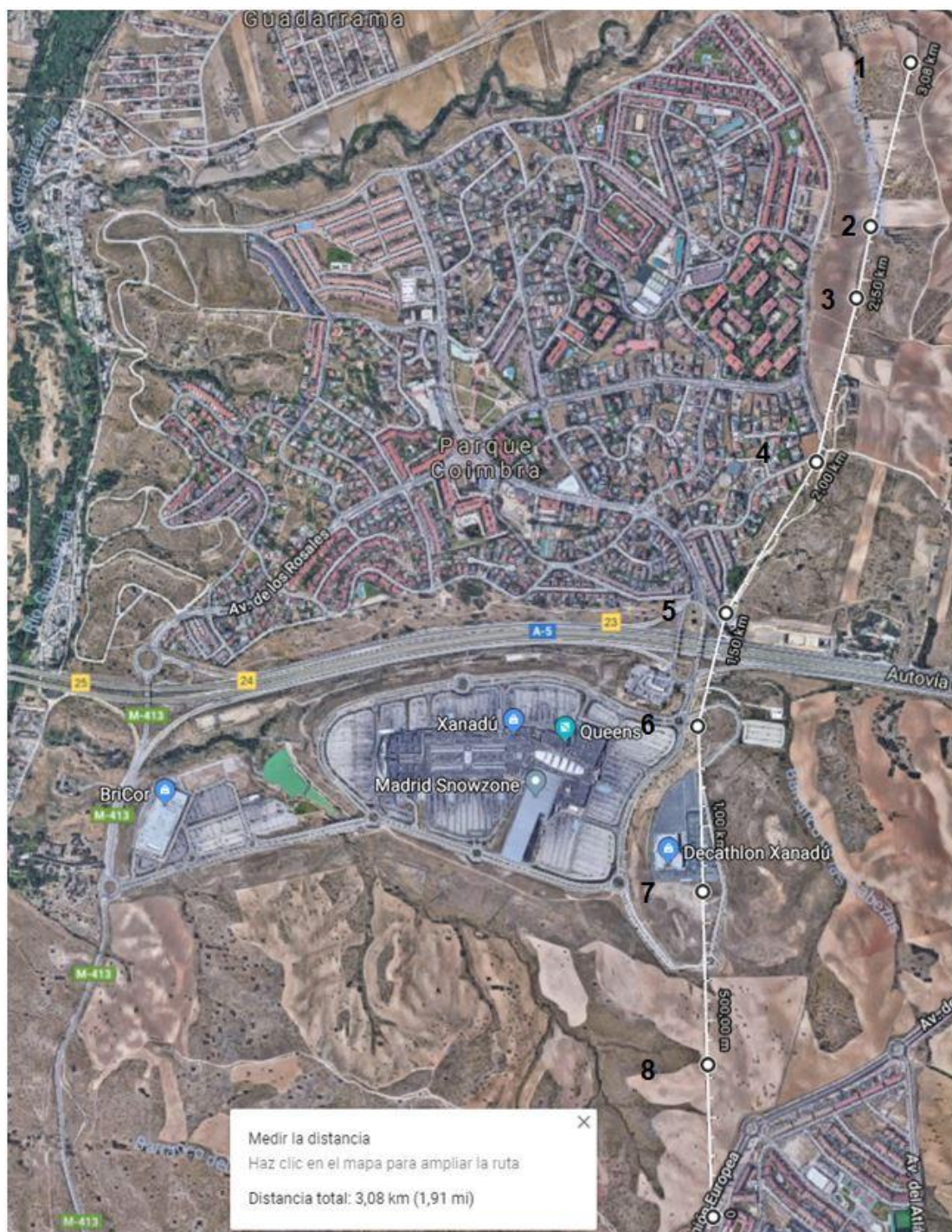


Ilustración 2. Situación de los apoyos. Móstoles. [22]

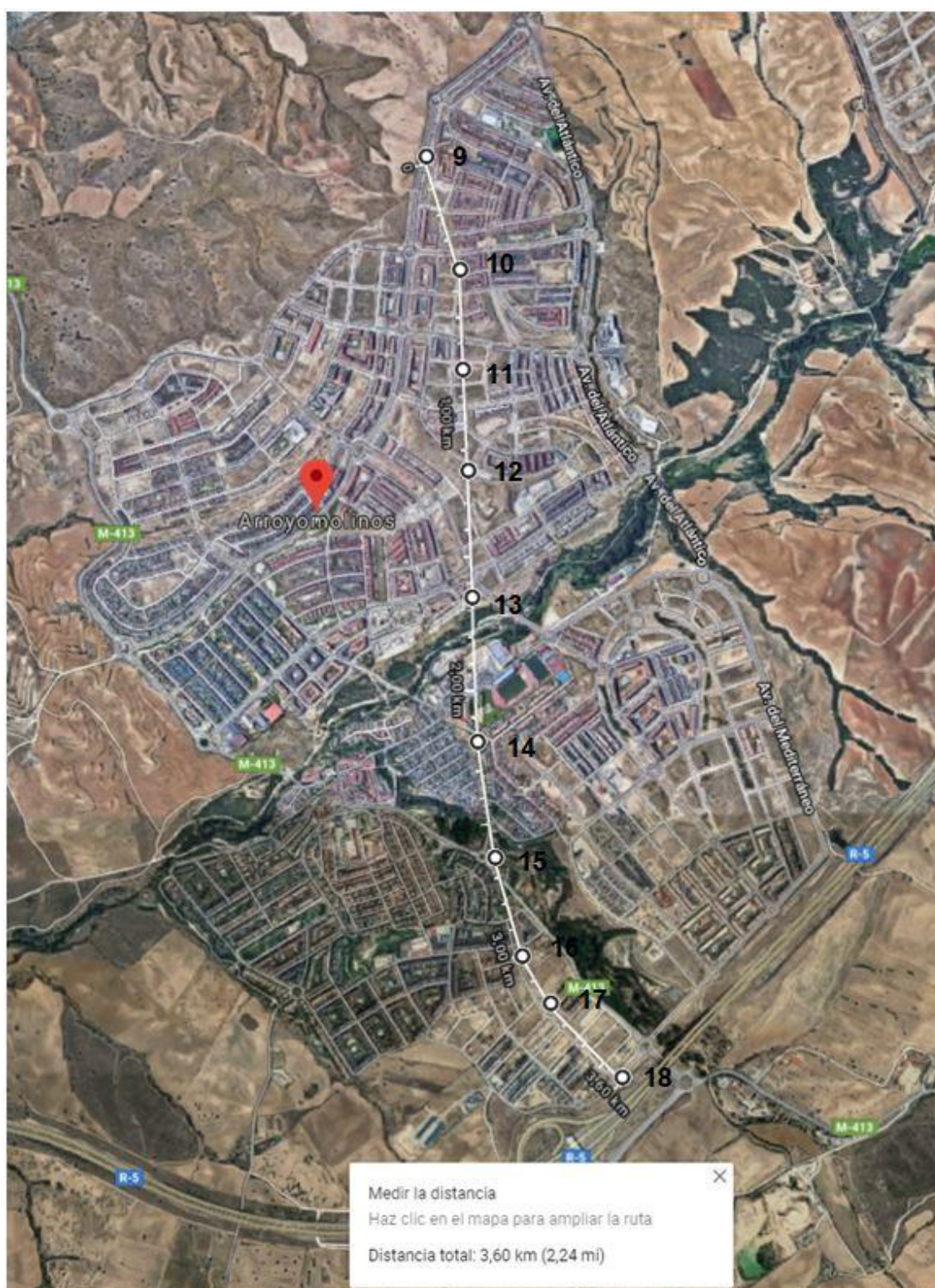


Ilustración 3. Situación de los apoyos. Arroyomolinos. [21]

2.2.Características de la línea

Las características de la línea proyectadas en el B.O.C.M Núm 160 [4] son las siguientes:

- Situación de la línea: Comunidad de Madrid, entre los municipios de Villaviciosa y Morata.
- Sistema: corriente alterna trifásica de la alta tensión.
- Frecuencia: 50Hz.
- Tensión nominal: 400 kV.
- Tensión más elevada de la red: 420 kV.
- Categoría: especial.
- Número de circuitos: 2.
- Número de conductores por fase: 3.
- Tipo de conductor aéreo: Cóndor AW.
- Potencia máxima de transporte: 450 MVA por circuito
- Número de apoyos: 18 (área de estudio).
- Longitud total: 13,7 km.
- Longitud de estudio: 6,68 km.
- Temperatura máxima del conductor: 85°C
- Zona de aplicación: Zona B.

2.3.Características del conductor

El conductor utilizado, especificado por el BOCM [4], es un conductor tipo CONDOR AW compuesto de 54 hilos de aluminio y 7 de acero reforzado. Estos conductores están formados por hilos de cables centrales de acero rodeados de forma concéntrica de hilos de aluminio.

Según la norma UNE 21018, el conductor tipo Condor tiene las características de la Tabla 1:

UNE 21018

Designación	Sección	Número de hilos		Diámetro	Masa/ unidad	Carga rotura nominal (Q_R)	Resistencia eléct. max. a 20°C	Módulo de elasticidad (E)	Coefficiente de elasticidad lineal (α)	Intensidad admisible
Nueva Antigua	mm ²	Al	Steel	m	kg/km	kg	Ω/km	kg/ mm ²	1/°C	A
402-AL1/52-20SA LARL 455 CONDOR	454,5	54	7	27,72 e-3	1520,9	13154,34	0,0718	6730,13	19,5 e-6	710

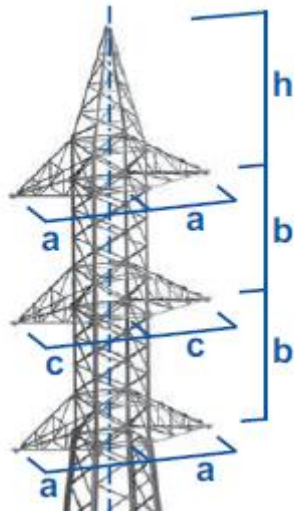
Tabla 1. Características de la línea

2.4. Características del apoyo

El apoyo seleccionado difiere al real debido a que no se ha encontrado un catálogo con las características de los apoyos utilizados para esta línea.

Por lo tanto, se han usado unos apoyos para líneas eléctricas de altas tensión, especiales para 400 kV, del fabricante IMEDEXSA [5].

El nombre del apoyo es el siguiente: TIPO ÍCARO N3 **IC-55.000-40-N3**. En la Tabla 2 se muestran las distancias especificadas por el fabricante:



	Distancia [m]
Altura libre	40
a	6,0
b	5,8
h	8,6

Tabla 2. Dimensiones del apoyo [5]

Ilustración 4. Dimensiones del apoyo [5]

2.5. Cantones

En la Tabla 3 se han nombrado los cantones de la A a la J y, además, se especifica qué apoyos, enumerados en el apartado 2.1, constituye cada cantón.

Cantón	Apoyo inicial	Apoyo final
A	1	4
B	4	5
C	5	6
D	6	9
E	9	10
F	10	14
G	14	15
H	15	16
I	16	17
J	17	18

Tabla 3. Cantones

2.6.Vanos

En la Tabla 4 se muestra la longitud de los vanos que conforman la línea,

Apoyos	Vano [m]
1-2	429,47
2-3	192,10
3-4	437,38
4-5	454,90
5-6	296,93
6-7	426,28
7-8	449,77
8-9	385,61
9-10	438,05
10-11	373,52
11-12	382,59
12-13	469,12
13-14	545,06
14-15	438,52
15-16	375,22
16-17	204,25
17-18	382,46

Tabla 4. Longitud de los vanos

2.7. Vanos ideales de regulación

El vano ideal de regulación es el cálculo equivalente del conjunto de n vanos pertenecientes a un cantón, se usa para realizar los cálculos técnicos. Se calcula según la ecuación (1) utilizada para desniveles pequeños de terreno.

$$a_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n a_i^3}{\sum_{i=1}^n a_i}} \quad (1)$$

Cantón	a_r [m]
A	400,64
B	454,90
C	296,93
D	423,04
E	438,05
F	455,53
G	438,52
H	375,22
I	204,25
J	382,46

Tabla 5. Vanos ideales de regulación.

Capítulo 3. Cálculos mecánicos

3.1. Hipótesis de sobrecarga

En el RLAT [6] viene especificado que las líneas iguales o superiores a 220kV se considerarán de categoría especial, por ello los cálculos se realizarán de acuerdo con la normativa para este tipo de líneas.

Las hipótesis de sobrecarga de una línea eléctrica son debidas a la tracción máxima por viento y a la tracción máxima por hielo. También se estudiará la tracción máxima del viento cuando el conductor está cubierto de hielo.

En el Apartado 3.1.3 del RLAT [6] se diferencian tres zonas según la altitud sobre el nivel del mar:

- Zona A: se encuentra a más de 500 metros sobre el nivel del mar
- Zona B: está entre 500 y 1000 metros sobre el nivel del mar
- Zona C: a más de 1000 metros sobre el nivel del mar.

Puesto que la altura sobre el nivel del mar del lugar de estudio es de 593 m, consideraremos una Zona B. Por tanto, los datos de la Tabla 6 son las hipótesis de sobrecarga especificadas en el apartado 3.2.1 del ITC-LAT 07 [6] para la zona B.

Aptdo. 3.2.1. ITC-LAT 07. Zona B

Zona B			
Hipótesis	Temperatura	Sobrecarga Viento	Sobrecarga hielo
Tracción máxima viento	-10	140 km/h Apartado 3.1.2	No se aplica
Tracción máxima de hielo	-15	No se aplica	Según el apartado 3.1.3
Tracción máxima de hielo + viento	-15	Mínimo 60 km/h Apartado 3.1.2	Según el apartado 3.1.3

Tabla 6. Tracción máxima admisible.

3.1.1. Tracción máxima viento

Según el RLAT [6], la presión que ejerce el viento sobre el conductor se calcula a partir de la ecuación (2)

$$q_v(d > 16mm) = K \left(\frac{V}{120} \right)^2 \left[\frac{kg}{m^2} \right] \quad (2)$$

- K=50, debido a que se trata de una línea de categoría especial
- V, velocidad del viento según Tabla 6

El peso aparente del hielo será:

$$P_{viento} = q_v \cdot d(m) \left[\frac{kg}{m} \right] \quad (3)$$

- d, diámetro del conductor

Finalmente se halla el peso aparente total, obtenido de la suma del peso del conductor y el peso aparente del viento, siguiendo la suma de vectores de la Ilustración 5.

$$P_{c,viento} = \sqrt{P_{cond}^2 + P_v^2} \left[kg/m \right] \quad (4)$$

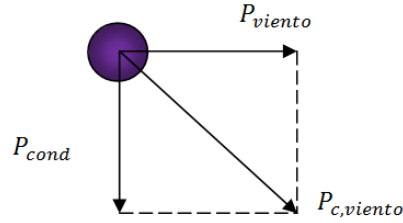


Ilustración 5. Peso aparente del conductor. Sobrecarga de viento

3.1.2.Tracción máxima hielo

Según el RLAT [6], el peso aparente del hielo se obtiene de la siguiente manera,

$$P_H = 0.18\sqrt{d(mm)} \left[kg/m \right] \quad (5)$$

El peso aparente total será la suma del peso del conductor y el peso aparente del hielo, como se muestra en la Ilustración 6.

$$P_{c,hielo} = P_{cond} + P_H \left[kg/m \right] \quad (6)$$

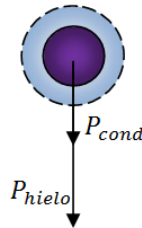


Ilustración 6. Peso aparente del conductor. Sobrecarga de hielo.

3.1.3.Tracción máxima viento y hielo

La presión que hace el viento cuando el cable aumenta de sección debido a la acumulación de hielo alrededor del conductor se calcula de la misma manera que en los apartados anteriores.

Se debe de hallar cuál es el diámetro de hielo acumulado, teniendo en cuenta que la densidad del hielo es de 900 kg/m³:

$$P_H = \rho \cdot S_H \quad (7)$$

$$S_H = \frac{0.9477}{900} = 1053 \text{ mm}^2$$

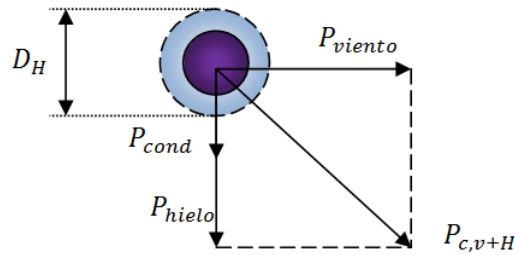
$$S_H = \pi \cdot (R_H^2 - R_C^2) = \pi \cdot \left(\frac{D_H^2}{4} - \frac{D_C^2}{4} \right) \quad (8)$$

$$S_H = \pi \cdot (R_H^2 - R_C^2) = \pi \cdot \left(\frac{D_H^2}{4} - \frac{D_C^2}{4} \right)$$

$$D_H = \sqrt{\left[\frac{S_H}{\pi} + \frac{D_C^2}{4} \right] \cdot 4} = 45.76 \text{ mm}$$

La presión aparente total se obtiene de la suma de los vectores del peso del conductor, peso aparente del hielo y el peso aparente del viento calculado con el diámetro del hielo de la manera en la que se explica en la Ilustración 7.

$$P_{c,v+H} = \sqrt{(P_{cond} + P_H)^2 + P_v^2} \quad (9)$$



**Ilustración 7. Peso aparente del conductor.
Sobrecarga de hielo y viento.**

Hipótesis	Peso del conductor [kg/m]	Velocidad del viento [km/h]	Presión viento [kg/m ²]	Peso aparente viento [kg/m]	Peso aparente hielo [kg/m]	Peso aparente total [kg/m]
Tracción máxima viento	1,5209	140	68,056	1,887	-	2,4232
Tracción máxima de hielo	1,5209	-	-	-	0,9477	2,4686
Tracción máxima de hielo + viento	1,5209	60	12,5	0,6095	0,9477	2,5891

Tabla 7. Resultados de las tracciones máximas admisibles

El peso aparente total mayor es el que se corresponde con tracción máxima de hielo y viento, por tanto, se considerará como la situación más desfavorable para los cálculos posteriores.

3.2.Hipótesis de tracción máxima

La tracción máxima se calcula escogiendo la situación más desfavorable de las tres hipótesis de sobrecargas anteriores. En este caso la situación más desfavorable es la de tracción máxima viento y hielo.

Esta situación, según el RLAT [6], se produce a una temperatura de -15 °C. La fuerza total obtenida en la hipótesis de hielo más viento es de 2.5891 [kg/m].

$$t \leq \frac{Q_R}{C \cdot S_c} \quad (10)$$

- Q_R : carga de rotura (Tabla 1)
- C : coeficiente de seguridad. Según el RLAT[6] el coeficiente de seguridad no debe ser inferior a 3 por lo que se supone para este cálculo un $C = 3$
- S_c : sección del conductor.

La tensión mecánica por unidad de sección en cualquier punto de la línea, según la ecuación (10):

$$t = 9,6475 \text{ [kg/mm}^2\text{]}$$

3.3.Hipótesis de flechas máximas

Las hipótesis de las flechas máximas se obtienen según las especificaciones de temperatura y tracción del apartado 3.2.3 del ITC-LAT 07 [6] para condiciones de viento, temperatura y hielo como se muestra en la Tabla 8.

	Viento	Temperatura	Hielo
Temperatura [°C]	15	85	0
Tracción [kg/mm ²]	Tracción máxima viento	Sólo se considera el peso del conductor	Tracción máxima hielo

Tabla 8. Flechas máximas

Para llevar a cabo las hipótesis de flechas máximas se realiza un modelo de deformación lineal basado en la *ecuación de cambios de condiciones* a través de la cual se podrá conocer un estado, llamado condición 2, a partir de un estado inicial de la línea, al que se denominará condición 1.

Las ecuaciones para el cambio de condiciones son las siguientes:

$$t_2^2 [t_2 - (K - \alpha E(\theta_2 - \theta_1))] = \frac{a^2 p_2^2 E}{24 s^2} \quad (11)$$

Siendo:

- $K = t_1 - \frac{a^2 p_1^2 E}{24 s^2 t_1^2}$
- t_i , la tracción de la condición i
- α , coeficiente de elasticidad lineal (Tabla 1)
- E , módulo de elasticidad (Tabla 1)
- θ_i , temperatura de la condición i
- a , vano
- p_i , peso específico de la condición i
- s , sección del conductor (Tabla 1).

Para realizar los cálculos, la ecuación (11) se simplifica en una ecuación de tercer grado de manera:

$$t_2^3 - A t_2^2 - C = 0 \quad (12)$$

Siendo:

- $A = K - \alpha E(\theta_2 - \theta_1)$
- $C = \frac{a^2 p_2^2 E}{24 s^2}$

Una vez obtenida la tracción de la condición 2, se pasará al cálculo de la flecha a través de la ecuación (13).

$$f_v = \frac{a^2 p_2}{8 s t_2} \quad (13)$$

En este apartado se considerarán como **condición 1** los valores siguientes obtenidos de la situación más desfavorable en la hipótesis de tracción máxima:

- $P_{c,v+H} = 2.589 \text{ kg/m}$
- $\theta_1 = -15^\circ\text{C}$
- $t_1 = 9.648 \text{ kg/mm}^2$

Los valores de la **condición 2** variarán para cada hipótesis según cada cantón como se indica en la Tabla 8.

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_2 [kg/mm ²]	f_v [m]
Hipótesis viento	-6,0460	-9,9832	1279,4935	8,3534	12,8061
Hipótesis temperatura	-6,0460	-19,1698	504,0249	4,6044	14,5818
Hipótesis hielo	-6,0460	-8,0146	1327,8552	8,8685	12,2880

Tabla 9. Hipótesis de flechas máximas. Cantón A

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_2 [kg/mm ²]	f_v [m]
Hipótesis viento	-10,5848	-14,5220	1649,5435	8,4702	16,2821
Hipótesis temperatura	-10,5848	-23,7086	649,7969	4,7762	18,1228
Hipótesis hielo	-10,5848	-12,5534	1711,8922	8,9272	15,7378

Tabla 10. Hipótesis de flechas máximas. Cantón B

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_2 [kg/mm ²]	f_v [m]
Hipótesis viento	1,0272	-2,9099	702,8134	8,0191	7,3274
Hipótesis temperatura	1,0272	-12,0966	276,8560	4,1305	8,9285
Hipótesis hielo	1,0272	-0,9414	729,3780	8,6984	6,8816

Tabla 11. Hipótesis de flechas máximas. Cantón C

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_2 [kg/mm ²]	f_v [m]
Hipótesis viento	-7,8496	-11,7868	1426,5421	8,4053	14,1896
Hipótesis temperatura	-7,8496	-20,9734	561,9510	4,6803	15,9939
Hipótesis hielo	-7,8496	-9,8182	1480,4619	8,8946	13,6600

Tabla 12. Hipótesis de flechas máximas. Cantón D

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_2 [kg/mm ²]	f_v [m]
Hipótesis viento	-9,1137	-13,0509	1529,6049	8,4371	15,1574
Hipótesis temperatura	-9,1137	-22,2375	602,5500	4,7271	16,9795
Hipótesis hielo	-9,1137	-11,0823	1587,4202	8,9106	14,6206

Tabla 13. Hipótesis de flechas máximas. Cantón E

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_2 [kg/mm ²]	f_v [m]
Hipótesis viento	-10,6407	-14,5778	1654,0972	8,4714	16,3247
Hipótesis temperatura	-10,6407	-23,7644	651,5907	4,7780	18,1662
Hipótesis hielo	-10,6407	-12,6093	1716,6181	8,9278	15,7802

Tabla 14. Hipótesis de flechas máximas. Cantón F

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_2 [kg/mm ²]	f_v [m]
Hipótesis viento	-9,1540	-13,0911	1532,8890	8,4380	15,1882
Hipótesis temperatura	-9,1540	-22,2778	603,8437	4,7286	17,0109
Hipótesis hielo	-9,1540	-11,1226	1590,8284	8,9111	14,6512

Tabla 15. Hipótesis de flechas máximas. Cantón G

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_2 [kg/mm ²]	f_v [m]
Hipótesis viento	-4,1178	-8,0549	1122,2868	8,2870	11,3225
Hipótesis temperatura	-4,1178	-17,2416	442,0971	4,5085	13,0623
Hipótesis hielo	-4,1178	-6,0864	1164,7065	8,8350	10,8192

Tabla 16. Hipótesis de flechas máximas. Cantón H

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_2 [kg/mm ²]	f_v [m]
Hipótesis viento	5,5686	1,6315	332,5493	7,5169	3,6987
Hipótesis temperatura	5,5686	-7,5551	130,9996	3,4501	5,0578
Hipótesis hielo	5,5686	3,6001	345,1188	8,4423	3,3550

Tabla 17. Hipótesis de flechas máximas. Cantón I

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_2 [kg/mm ²]	f_v [m]
Hipótesis viento	-4,6542	-8,5913	1166,0145	8,3068	11,7357
Hipótesis temperatura	-4,6542	-17,7779	459,3226	4,5369	13,4861
Hipótesis hielo	-4,6542	-6,6227	1210,0869	8,8450	11,2280

Tabla 18. Hipótesis de flechas máximas. Cantón J

Se puede observar en los resultados de la Tabla 8 a la Tabla 18 que las flechas máximas se obtendrán para condiciones similares a las expuestas en la hipótesis de temperatura.

3.4. Comprobación de fenómenos vibratorios

Los fenómenos vibratorios de los conductores vienen dados por la fuerza del viento y pueden provocar, no sólo fallos en la red, sino también un deterioro en la aparamenta propia de la línea.

Según el RLAT [6] se deben distinguir dos casos diferentes para el estudio de los fenómenos vibratorios. La Tensión de Cada Día (TCD) que no debe superar el 20% de la carga de rotura calculada en la hipótesis de tracción máxima y la Tensión en Horas Frías (THF) la cual no debe superar el 22,5% de la carga de rotura.

En la Tabla 19 se muestran los datos que se especifican en el apartado 3.2.2 en el ITC-LAT 07 [6] para realizar los cálculos de la TCD y THF.

Aptdo. 3.2.2 ITC-LAT 07		
	Tensión de Cada Día (TCD)	Tensión en Horas Frías (THF)
Temperatura [°C]	15	-5
Tracción [kg/mm ²]	Sólo se considera el peso del conductor	Sólo se considera el peso del conductor
Condición	$T_{CD} < 20\% Q_R$	$T_{HF} < 22.5\% Q_R$

Tabla 19. Fenómenos vibratorios.

La carga soportada en cada cantón será calculada según la expresión (14)

$$T_{\{CD}_{HF} = t_{\{CD}_{HF} \cdot s \quad (14)$$

donde:

- $t_{\{CD}_{HF}$ es la tracción calculada con la *ecuación de cambio de condiciones* según la ecuación (12), considerando condición 1 como la tracción de hielo y viento en la hipótesis de tracción máxima.
- s , es la sección del conductor en mm².

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{CD} [kg/mm ²]	T_{CD} [kg]
Tensión de Cada Día (TCD)	-6,0460	-9,9832	504,0249	5,6738	2578,7339
	TCD<0,20·QR NO existirán fenómenos vibratorios				
	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{HF} [kg/mm ²]	T_{HF} [kg]
Tensión en Horas Frías (THF)	-6,0460	-7,3584	504,0249	6,1160	2779,7418
	THF<0,225·QR NO existirán fenómenos vibratorios				

Tabla 20. Fenómenos vibratorios. Cantón A

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{CD} [kg/mm ²]	T_{CD} [kg]
Tensión de Cada Día (TCD)	-10,5848	-14,5220	649,7969	5,6725	2578,1417
	TCD<0,20·QR NO existirán fenómenos vibratorios				
	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{HF} [kg/mm ²]	T_{HF} [kg]
Tensión en Horas Frías (THF)	-10,5848	-11,8972	649,7969	6,0219	2736,9376
	THF<0,225·QR NO existirán fenómenos vibratorios				

Tabla 21. Fenómenos vibratorios. Cantón B

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{CD} [kg/mm ²]	T_{CD} [kg]
Tensión de Cada Día (TCD)	1,0272	-2,9099	276,8560	5,6779	2580,5937
	TCD<0,20·QR NO existirán fenómenos vibratorios				
	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{HF} [kg/mm ²]	T_{HF} [kg]
Tensión en Horas Frías (THF)	1,0272	-0,2852	276,8560	6,4239	2919,6468
	THF<0,225·QR NO existirán fenómenos vibratorios				

Tabla 22. Fenómenos vibratorios. Cantón C

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{CD} [kg/mm ²]	T_{CD} [kg]
Tensión de Cada Día (TCD)	-7,8496	-11,7868	561,9510	5,6732	2578,4669
	TCD<0,20·QR NO existirán fenómenos vibratorios				
	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{HF} [kg/mm ²]	T_{HF} [kg]
Tensión en Horas Frías (THF)	-7,8496	-9,1620	561,9510	6,0733	2760,3088
	THF<0,225·QR NO existirán fenómenos vibratorios				

Tabla 23. Fenómenos vibratorios. Cantón D

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{CD} [kg/mm ²]	T_{CD} [kg]
Tensión de Cada Día (TCD)	-9,1137	-13,0509	602,5500	5,6728	2578,3064
	TCD<0,20·QR NO existirán fenómenos vibratorios				
	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{HF} [kg/mm ²]	T_{HF} [kg]
Tensión en Horas Frías (THF)	-9,1137	-10,4261	602,5500	6,0478	2748,7289
	THF<0,225·QR NO existirán fenómenos vibratorios				

Tabla 24. Fenómenos vibratorios. Cantón E

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{CD} [kg/mm ²]	T_{CD} [kg]
Tensión de Cada Día (TCD)	-10,6407	-14,5778	651,5907	5,6725	2578,1359
	TCD<0,20·QR NO existirán fenómenos vibratorios				
	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{HF} [kg/mm ²]	T_{HF} [kg]
Tensión en Horas Frías (THF)	-10,6407	-11,9531	651,5907	6,0209	2736,5211
	THF<0,225·QR NO existirán fenómenos vibratorios				

Tabla 25. Fenómenos vibratorios. Cantón F

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{CD} [kg/mm ²]	T_{CD} [kg]
Tensión de Cada Día (TCD)	-9,1540	-13,0911	603,8437	5,6728	2578,3016
	TCD<0,20·QR NO existirán fenómenos vibratorios				
	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{HF} [kg/mm ²]	T_{HF} [kg]
Tensión en Horas Frías (THF)	-9,1540	-10,4664	603,8437	6,0470	2748,3835
	THF<0,225·QR NO existirán fenómenos vibratorios				

Tabla 26. Fenómenos vibratorios. Cantón G

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{CD} [kg/mm ²]	T_{CD} [kg]
Tensión de Cada Día (TCD)	-4,1178	-8,0549	442,0971	5,6746	2579,0836
	TCD<0,20·QR NO existirán fenómenos vibratorios				
	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{HF} [kg/mm ²]	T_{HF} [kg]
Tensión en Horas Frías (THF)	-4,1178	-5,4302	442,0971	6,1727	2805,4947
	THF<0,225·QR NO existirán fenómenos vibratorios				

Tabla 27. Fenómenos vibratorios. Cantón H

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{CD} [kg/mm ²]	T_{CD} [kg]
Tensión de Cada Día (TCD)	5,5686	1,6315	130,9996	5,6849	2583,7960
	TCD<0,20·QR NO existirán fenómenos vibratorios				
	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{HF} [kg/mm ²]	T_{HF} [kg]
Tensión en Horas Frías (THF)	5,5686	4,2563	130,9996	6,9603	3163,4562
	THF>0,225·QR Existirán fenómenos vibratorios				

Tabla 28. Fenómenos vibratorios. Cantón I

Puesto que en este cantón existen fenómenos vibratorios se deberán disponer amortiguadores a lo largo de este tramo. Los amortiguadores elegidos son del fabricante SAPREM [7] con un código de referencia AMG-152434 cuyas características con las siguientes:

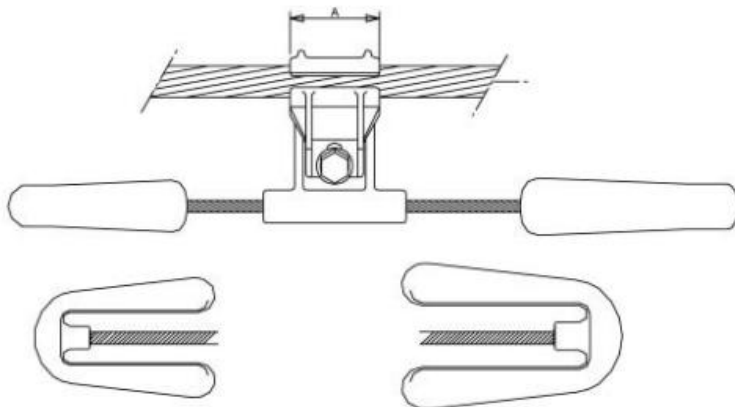


Ilustración 8. Amortiguador [7]

Rango de grapa	A	Tornillo	Contrapesos		Amortiguador
23 - 34 mm	63	M-12	5	2,4	4,65

Tabla 29. Características del amortiguador [7]

	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{CD} [kg/mm ²]	T_{CD} [kg]
Tensión de Cada Día (TCD)	-4,6542	-8,5913	459,3226	5,6743	2578,9785
	TCD<0,20·QR NO existirán fenómenos vibratorios				
	K [kg/mm ²]	A [kg/mm ²]	C [(kg/mm ²) ³]	t_{HF} [kg/mm ²]	T_{HF} [kg]
Tensión en Horas Frías (THF)	-4,6542	-5,9665	459,3226	6,1556	2797,7150
	THF<0,225·QR NO existirán fenómenos vibratorios				

Tabla 30. Fenómenos vibratorios. Cantón J

En las Tabla 20 a la Tabla 28 se ha estudiado la existencia de fenómenos vibratorios para cada cantón, siendo únicamente existente en el cantón I por lo que se deberán colocar los amortiguadores expuestos en la Tabla 29 a lo largo de este tramo.

3.5.Tabla de tendido

3.5.1.Tabla de tendido. Tracción [daN/mm²]

En este apartado se ha calculado la tracción [daN/mm²] para un rango de temperaturas comprendido entre -5 y 45 °C.

Se ha hecho uso de las ecuaciones de *cambio de condiciones* tal y como se ha explicado en el apartado de hipótesis de flechas máximas.

Tabla de tendido. Tracción											
Temperatura [°C]	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Cantón A t [daN/mm ²]	6,00	5,88	5,77	5,67	5,56	5,47	5,38	5,29	5,20	5,12	5,04
Cantón B t [daN/mm ²]	5,91	5,81	5,73	5,64	5,56	5,49	5,41	5,34	5,27	5,20	5,14
Cantón C t [daN/mm ²]	6,30	6,10	5,91	5,73	5,57	5,41	5,27	5,13	5,00	4,88	4,77
Cantón D t [daN/mm ²]	5,96	5,85	5,75	5,66	5,56	5,48	5,39	5,31	5,23	5,16	5,08
Cantón E t [daN/mm ²]	5,93	5,83	5,74	5,65	5,56	5,48	5,40	5,32	5,25	5,18	5,11
Cantón F t [daN/mm ²]	5,90	5,81	5,73	5,64	5,56	5,49	5,41	5,34	5,27	5,20	5,14
Cantón G t [daN/mm ²]	5,93	5,83	5,74	5,65	5,56	5,48	5,40	5,32	5,25	5,18	5,11
Cantón H t [daN/mm ²]	6,05	5,92	5,80	5,68	5,56	5,46	5,35	5,26	5,16	5,07	4,99
Cantón I t [daN/mm ²]	6,83	6,48	6,15	5,85	5,58	5,32	5,09	4,87	4,68	4,50	4,33
Cantón J t [daN/mm ²]	6,04	5,91	5,79	5,67	5,56	5,46	5,36	5,27	5,18	5,09	5,01

Tabla 31. Tabla de tendido. Tracción

En la Tabla 31 se puede observar que las tracciones máximas se obtienen para temperaturas bajas. En este caso la temperatura más baja estudiada es de -5 °C.

3.5.2. Tabla de tendido. Flecha [m]

Para el cálculo de las flechas en la tabla de tendido que se muestra a continuación es necesario calcular, en primer lugar, la flecha (f_r) haciendo uso del vano regulador (ecuación (13)) de cada cantón. Finalmente, con la ecuación (15), se calculan las flechas para cada vano.

$$f_i = \left(\frac{a_i}{a_r}\right)^2 f_r \quad (15)$$

Tabla de tendido. Flecha											
Cantón A											
Temperatura [°C]	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
f_r [m] ($a_r=400,64\text{m}$)	11,19	11,42	11,63	11,85	12,07	12,28	12,49	12,70	12,91	13,11	13,31
f_i [m] ($a=429,47\text{m}$)	12,86	13,12	13,37	13,62	13,87	14,11	14,35	14,59	14,83	15,07	15,30
f_i [m] ($a=192,10\text{m}$)	2,57	2,62	2,67	2,72	2,77	2,82	2,87	2,92	2,97	3,01	3,06
f_i [m] ($a=437,38\text{m}$)	13,34	13,61	13,87	14,13	14,38	14,64	14,89	15,14	15,38	15,63	15,87
Cantón B											
Temperatura [°C]	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
f_r [m] ($a_r=454,9\text{m}$)	14,66	14,89	15,11	15,34	15,56	15,78	16,00	16,22	16,43	16,64	16,86
Cantón C											
Temperatura [°C]	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
f_r [m] ($a_r=296,93\text{m}$)	5,85	6,05	6,24	6,43	6,62	6,81	7,00	7,19	7,37	7,55	7,73
Cantón D											
Temperatura [°C]	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
f_r [m] ($a_r=423,04\text{m}$)	12,57	12,79	13,02	13,24	13,45	13,67	13,89	14,10	14,31	14,52	14,72
f_i [m] ($a=385,61\text{m}$)	10,44	10,63	10,81	11,00	11,18	11,36	11,54	11,71	11,89	12,06	12,23
f_i [m] ($a=449,77\text{m}$)	14,21	14,46	14,71	14,96	15,21	15,45	15,70	15,94	16,17	16,41	16,64
f_i [m] ($a=426,28\text{m}$)	12,76	12,99	13,22	13,44	13,66	13,88	14,10	14,32	14,53	14,74	14,95
Cantón E											
Temperatura [°C]	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
f_r [m] ($a_r=438,05\text{m}$)	13,53	13,76	13,98	14,21	14,43	14,65	14,86	15,08	15,29	15,50	15,71
Cantón F											
Temperatura [°C]	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
f_r [m] ($a_r=438,52\text{m}$)	14,70	14,93	15,16	15,38	15,60	15,82	16,04	16,26	16,47	16,69	16,90
f_i [m] ($a=455,53\text{m}$)	15,86	16,11	16,35	16,60	16,84	17,08	17,31	17,55	17,78	18,01	18,23

fi [m] (a=373,52m)	10,67	10,83	11,00	11,16	11,32	11,48	11,64	11,80	11,95	12,11	12,26
fi [m] (a=352,59m)	9,50	9,65	9,80	9,94	10,09	10,23	10,37	10,51	10,65	10,79	10,92
fi [m] (a=469,12m)	16,82	17,09	17,34	17,60	17,86	18,11	18,36	18,61	18,85	19,10	19,34
fi [m] (a=454,06m)	15,76	16,01	16,25	16,49	16,73	16,97	17,20	17,43	17,66	17,89	18,12
Cantón G											
Temperatura [°C]	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
fr [m] (ar=438,52m)	13,56	13,79	14,02	14,24	14,46	14,68	14,89	15,11	15,32	15,53	15,74
Cantón H											
Temperatura [°C]	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
fr [m] (ar=375,22m)	9,73	9,95	10,16	10,37	10,58	10,79	11,00	11,20	11,40	11,61	11,80
Cantón I											
Temperatura [°C]	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
fr [m] (ar=204,25m)	2,56	2,69	2,84	2,98	3,13	3,28	3,43	3,58	3,73	3,88	4,03
Cantón J											
Temperatura [°C]	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
fr [m] (ar=382,46m)	10,14	10,35	10,57	10,78	11,00	11,21	11,41	11,62	11,82	12,02	12,22

Tabla 32. Tabla de tendido. Flecha

Las flechas máximas se obtienen a temperaturas altas. En la Tabla 32 se han recuadrado las flechas máximas.

3.6. Distancias de seguridad

La distancia de seguridad es la referencia de la altura mínima del apoyo para evitar riesgos de descargas. Es interesante estudiar las distancias de seguridad, puesto que, al haber aumentado la zona urbana por lugares donde transcurre la línea, se debe comprobar que se siguen respetando dichas distancias para zonas urbanas.

Observando la situación de los apoyos en la Ilustración 2 e Ilustración 3 se distinguen tres pasos distintos:

- Cantón A y B: paso por zona urbana
- Cantón C: cruzamiento por carretera
- Cantón D y E: paso por zona urbana
- Cantón F, G y H: paso por zona urbana y por arboleda
- Cantón I y J: paso por zona urbana.

Con la ecuación (16) se calcula la distancia de seguridad de cada zona según los datos proporcionados por el RLAT [6].

$$D_{add} + D_{el} \quad (16)$$

Siendo:

- D_{el} : distancia de aislamiento eléctrico para evitar descargas entre conductor y suelo indicado en la tabla 15 de ITC - LAT 07[6]. Para líneas especiales con una tensión más elevada de la red de 420 kV, la distancia D_{el} es de 2,8 m
- D_{add} : distancia adicional entre suelo y conductores. Esta distancia viene especificada en el RLAT [6] para paso de la línea por zonas especiales.

La distancia de seguridad de la línea al pasar por **zona urbana** viene especificada en el apartado 5.12.2 del ITC-LAT 07[6]. En este apartado obtenemos que la distancia adicional necesaria debe ser de 3,3 m y que el valor de la suma de ambas distancias debe ser mínimo de 5 m.

$$D_{add} + D_{el} = 3,3 + 2,8 = 6,1 [m] > 5 [m]$$

Se observa como la distancia de seguridad es mayor a 5m.

El **cruce de la línea por carretera** debe tener una distancia de seguridad tal que cumpla los requisitos del apartado 5.7 de ITC-LAT 07 [6] en el que la distancia adicional debe ser de 7,5 m para líneas de categoría especial y la distancia total de la ecuación (16) sea mayor de 7 m.

$$D_{add} + D_{el} = 7,5 + 2,8 = 10,3 [m] > 7 [m]$$

La distancia de seguridad total para el cruce por carretera es mucho mayor a 7m.

Entre el cantón F y H, puesto que existe zona con bosque y zona urbana, se aplicará la distancia de seguridad más restrictiva, que en este caso es la de zona urbana.

A continuación, se calculará la mínima altura libre del apoyo sumando la flecha máxima de cada cantón, obtenidas de los estudios de la hipótesis de flechas máximas y de la tabla de tendido, con la distancia de seguridad. La flecha máxima ha sido escogida como el valor máximo de las flechas calculadas por la hipótesis de flecha máxima y la tabla de tendido referente a las flechas.

Flecha máxima [m]	$D_{add} + D_{el}$ [m]	Altura libre [m]
15,87	6,1	21,97

Tabla 33. Distancia de seguridad. Cantón A

Flecha máxima [m]	$D_{add} + D_{el}$ [m]	Altura libre [m]
18,12	6,1	24,22

Tabla 34. Distancia de seguridad. Cantón B

Flecha máxima [m]	$D_{add} + D_{el}$ [m]	Altura libre [m]
8,93	10,3	19,23

Tabla 35. Distancia de seguridad. Cantón C

Flecha máxima [m]	$D_{add} + D_{el}$ [m]	Altura libre [m]
16,64	6,1	22,74

Tabla 36. Distancia de seguridad. Cantón D

Flecha máxima [m]	$D_{add} + D_{el}$ [m]	Altura libre [m]
16,98	6,1	23,08

Tabla 37. Distancia de seguridad. Cantón E

Flecha máxima [m]	$D_{add} + D_{el}$ [m]	Altura libre [m]
19,34	6,1	25,44

Tabla 38. Distancia de seguridad. Cantón F

Flecha máxima [m]	$D_{add} + D_{el}$ [m]	Altura libre [m]
17,01	6,1	23,11

Tabla 39. Distancia de seguridad. Cantón G

Flecha máxima [m]	$D_{add} + D_{el}$ [m]	Altura libre [m]
13,06	6,1	19,16

Tabla 40. Distancia de seguridad. Cantón H

Flecha máxima [m]	$D_{add} + D_{el}$ [m]	Altura libre [m]
5,06	6,1	11,16

Tabla 41. Distancia de seguridad. Cantón I

Flecha máxima [m]	$D_{add} + D_{el}$ [m]	Altura libre [m]
13,49	6,1	19,59

Tabla 42. Distancia de seguridad. Cantón J

Según los resultados obtenidos de altura se ha elegido un apoyo de 40 m de altura libre, las características de este apoyo vienen determinadas en el apartado 2.4. Habrá que tener en cuenta la longitud de la cadena de aisladores, por ello, se ha escogido un apoyo lo suficientemente alto para que los apoyos de alineación, cuyos aisladores son en suspensión, cumplan con la distancia de seguridad determinada.

Como no se tienen las dimensiones del apoyo real se ha elegido un tipo de apoyo correspondiente a las características del apoyo aquí calculado. Pero para estudiar que realmente se cumplen las distancias de seguridad se deberán dimensionar los apoyos ya existentes.

Capítulo 4. Cálculos eléctricos

Los cálculos eléctricos se dividen en dos bloques:

El primero consiste en la resolución del circuito equivalente de la línea. Se hallan valores tanto de intensidades y tensiones nominales, cómo de resistencias, inductancias y capacidad propias, obteniendo así el circuito equivalente.

El segundo consiste en comprobar que el conductor cumple los siguientes requisitos especificados por el RLAT en el Apartado 4.1[6]:

1. La intensidad máxima admisible debe ser mayor a la intensidad nominal. La intensidad máxima admisible se calculará de dos maneras, la primera a través de la densidad de corriente y la segunda por medio de equilibrio térmico.
2. La caída de tensión debe ser preferiblemente no superior al 5%.
3. Los valores de las pérdidas de potencia, compuestas por las pérdidas por efecto Joule y corona, deben de encontrarse dentro de unos límites aceptables.

4.1.Circuito equivalente

4.1.1.Intensidad nominal

La intensidad nominal se calcula a partir de potencia aparente de la línea (450 MVA)

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (17)$$

$$I = 649,5191 \text{ A}$$

Calculamos el número de conductores por fase relacionando la intensidad admisible del conductor con la intensidad nominal

$$N^{\circ} \text{ conductores} = \frac{I}{I_{adm}} = 0,915 \sim 1$$

4.1.2.Resistencia y efecto Kelvin o pelicular

El valor de la resistencia de la línea depende de la temperatura a la que se encuentre, por ello, en la Tabla 43 se calcula la resistencia en continua y alterna para un rango de temperaturas.

$$R_{cc\theta} = R_{cc20} (1 + \alpha \cdot (\theta - 20)) \quad (18)$$

$$R_{ca\theta} = R_{cc\theta} \cdot (1 + 7,5 \cdot f^2 \cdot D^4 \cdot 10^{-7}) \quad (19)$$

- θ : temperatura [°C]
- f : frecuencia
- D : diámetro del conductor [cm]

Se relaciona la resistencia de corriente alterna con la resistencia de corriente continua para estudiar el efecto pelicular

	$R_{cc} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$	$R_{ca} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$	R_{ca}/R_{cc}
25 °C	0,0718	0,0798	1,1107
50 °C	0,0718	0,0798	1,1107
85 °C	0,0719	0,0798	1,1107

Tabla 43. Resistencia de la línea y efecto pelicular

$$R_{ca_0} = 1,093 \left[\Omega \right]$$

Se observa que existe efecto pelicular debido a que la resistencia en corriente alterna es ligeramente superior a la corriente continua. Esto es debido a que la corriente alterna induce unas corrientes que hace que se produzca una distribución desigual de la densidad de corriente, aumentando en la zona exterior y disminuyendo en la parte central del conductor.

4.1.3. Inductancia y capacidad de una línea trifásica

4.1.3.1. Distancias entre fases

Antes de realizar el cálculo de la inductancia y capacidad, se debe medir las distancias existentes entre fases señaladas en la Ilustración 9.

Las características de este apoyo vienen especificadas en el apartado 2.4.

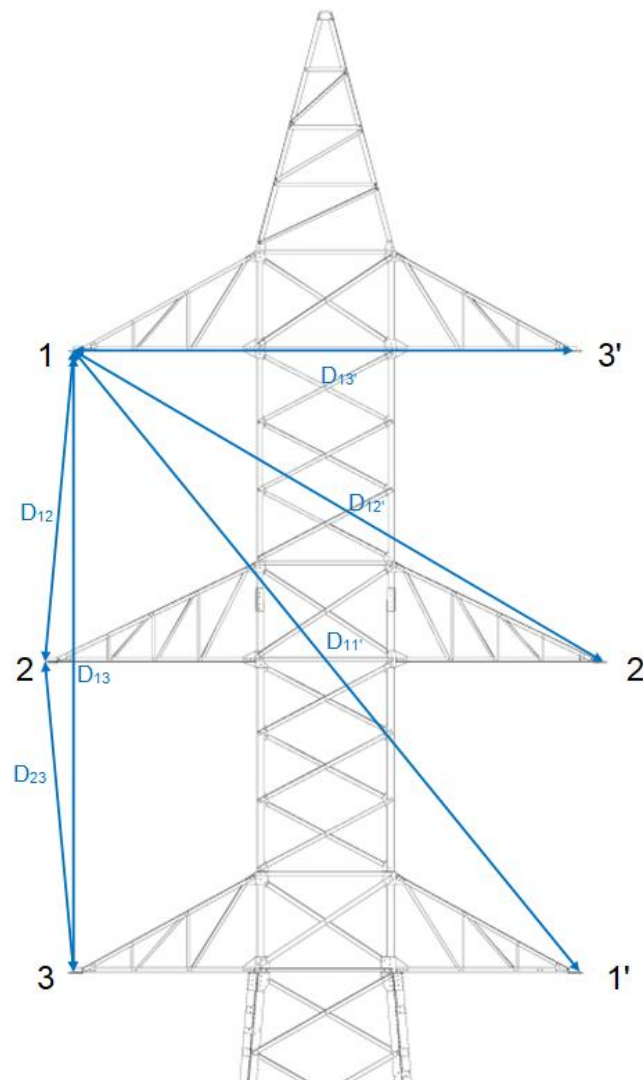


Ilustración 9. Distancias entre fases

$$\begin{aligned}D_{13'} &= 12 \text{ [m]} \\D_{12'} &= 13,78 \text{ [m]} \\D_{11'} &= 16,69 \text{ [m]} \\D_{12} &= 5,82 \text{ [m]} \\D_{13} &= 11,6 \text{ [m]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}D_{23'} &= D_{12'} \\D_{22'} &= D_{13'} \\D_{21'} &= D_{12'} \\D_{23} &= D_{12} \\D_{33'} &= D_{11'} \\D_{32'} &= D_{12'}\end{aligned}$$

4.1.3.2. Inductancia

La inductancia por fase ha sido obtenida según la ecuación de una línea de doble circuito dúplex (20), demostrada en el apartado 1.2.2.2.1 del cálculo eléctrico de líneas [8]:

$$L'_a = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{DMG_{ff}}{DMG'_f} \quad [H/km] \quad (20)$$

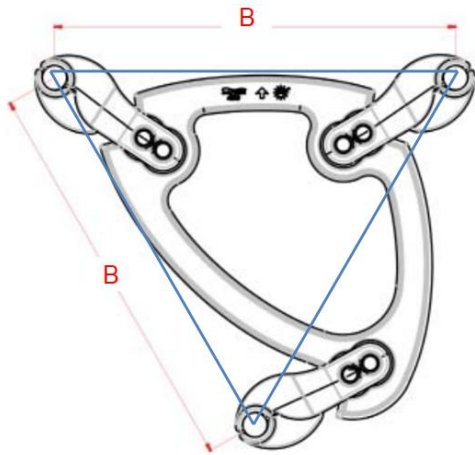
Y la inductancia por cada circuito será el doble de la calculada anteriormente.

$$L' = 2 \cdot L'_a \quad (21)$$

Para calcular la inductancia se debe obtener antes el radio medio geométrico y la distancia media geométrica:

- Radio medio geométrico (RMG).

Para calcular el RMG debemos conocer el radio del conductor, Tabla 1, y la distancia de los conductores por cada fase, para ello cogemos un separador de referencia, acorde con las características del conductor, como el que se indica a continuación.



SAPREM [7]. Separador amortiguador Triplex. SPA450TA30.

Nº conductores	Ø cable [mm]	B [mm]
3	27,6 - 30,6	450

Tabla 44. Características del separador [7]

Ilustración 10. Separador [7]

Por tanto el RMG será:

$$RMG' = \sqrt{r' \cdot d(km)} \quad (22)$$

donde,

- $r' = e^{-\frac{1}{4}} \cdot r_c [km]$, considerando r_c como la separación entre los conductores
- d, diámetro del conductor

$$RMG' = 1,2978 \cdot 10^{-4} [km]$$

- Distancias medias geométricas (DMG).

DMG_{ff} : distancia media geométrica entre fases de línea de dos circuitos.

$$DMG_{ff} = \sqrt[3]{(D_{12} \cdot D_{12'} \cdot D_{1'2} \cdot D_{1'2'})^{1/4} \cdot (D_{23} \cdot D_{23'} \cdot D_{2'3} \cdot D_{2'3'})^{1/4} \cdot (D_{31} \cdot D_{31'} \cdot D_{3'1} \cdot D_{3'1'})^{1/4}} \quad (23)$$

$$DMG_{ff} = 0,0098 [km]$$

DMG'_f : distancia media geométrica de fase de línea de dos circuitos.

$$DMG'_f = (RMG'^{1/2}) \cdot (D_{11'} \cdot D_{22'} \cdot D_{33'})^{1/6} \quad (24)$$

$$DMG'_f = 4,1253 \cdot 10^{-8} [km]$$

Por lo tanto, la inductancia por fase y por longitud será:

$$L'_a = 0,0025 [H/km]$$

Considerando la distancia total de la línea se puede sacar la inductancia por fase de la línea,

$$L_a = 0,0339 [H]$$

Y la inductancia por circuito:

$$L' = 0,005 [H/km]$$

$$L = 0,0678 [H]$$

4.1.3.3.Capacidad

La capacidad por fase se calcula según la expresión (25), obtenida del apartado 1.2.2.3.1 del cálculo eléctrico de líneas para líneas de doble circuito dúplex [8]:

$$C'_{an} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{DMG_{ff}}{DMG_f}} = \frac{0,0556}{\ln \frac{DMG_{ff}}{DMG_f}} \quad \left[\frac{\mu F}{km} \right] \quad (25)$$

- Radio medio geométrico (RMG).

$$RMG = \sqrt{r \cdot d(km)} \quad (26)$$

$$RMG = 1,4106 \cdot 10^{-4} [km]$$

- Distancias medias geométricas (DMG).

$$DMG_f = [(RMG \cdot D_{11'}) \cdot (RMG \cdot D_{22'}) \cdot (RMG \cdot D_{33'})]^{1/6} \quad (27)$$

$$DMG_f = 0,0015 [km]$$

Con la ecuación (25) se obtiene la capacidad:

$$C'_{an} = 0,0293 \left[\frac{\mu F}{km} \right]$$

$$C'_{an} = 0,4014 [\mu F]$$

4.2. Modelo de línea: A, B, C y D del cuadripolo equivalente.

Se considera como línea corta para los cálculos de circuito equivalente puesto que tiene menos de 50 km de longitud.

Puesto que es línea corta, la capacidad es despreciable por lo que el circuito fase-neutro equivalente es el siguiente:

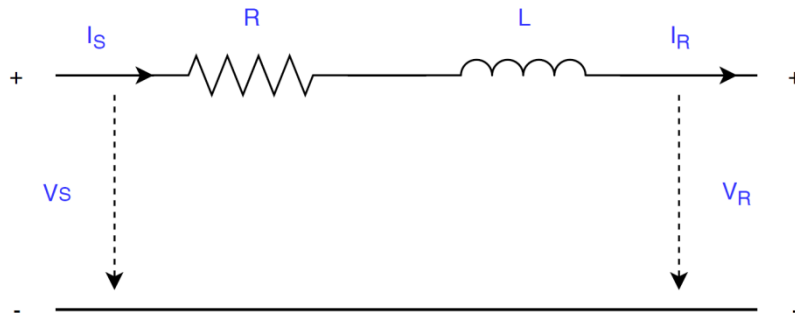


Ilustración 11. Circuito equivalente

La relación que permite obtener las tensiones y las corrientes de la línea en función de los valores de tensión y corriente del receptor es la siguiente.

$$\begin{pmatrix} \vec{V}_s \\ \vec{I}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{V}_R \\ \vec{I}_R \end{pmatrix} \quad (28)$$

Los parámetros A, B, C, D para líneas cortas son:

$$\begin{aligned} A &= 1 \\ B &= R_{ca} + j\omega L_a \\ C &= 0 \\ D &= 1 \end{aligned} \quad (29)$$

Por tanto, las ecuaciones que se obtienen de la relación (28) serán:

$$\begin{aligned} V_S &= V_R + (R_{ca} + j\omega L_a)I_R \angle \varphi \\ I_S &= I_R \angle \varphi \end{aligned} \quad (30)$$

De esta manera, ya se conocen todos los parámetros de la línea

4.3. Intensidad máxima admisible

4.3.1. Cálculo de la intensidad máxima admisible a través de la densidad de corriente

Esta intensidad se calcula a partir de los valores de densidad de corriente de la tabla 11 del ITC-LAT 07[6] que ha sido representada en esta memoria mediante un gráfico para los diferentes materiales del conductor como se muestra en la Ilustración 12.

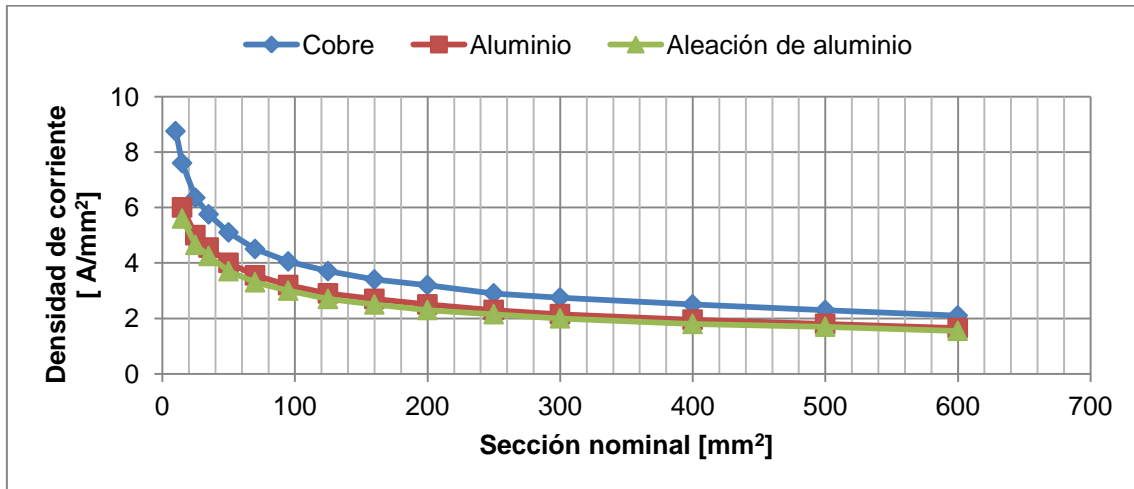


Ilustración 12. Densidad máxima de corriente

En este caso se tiene un conductor cuyo material predominante es el aluminio, por tanto, se escogerá la curva del aluminio como base. El valor de densidad de corriente para un conductor de aluminio con una sección de cable determinada en la Tabla 1 es:

$$\vartheta_{Al} = 1.87 [A/mm^2]$$

Puesto que el conductor es mixto, contiene 54 hilos de aluminio y 7 de acero, se debe aplicar un coeficiente de reducción de 0,95 al valor obtenido anteriormente en el Apartado 4.2.1 de la ITC-LAT-07 [6]. Por consiguiente, la densidad resultante es:

$$\vartheta_{Al+Steel} = 1.78 [A/mm^2]$$

La intensidad máxima admisible será:

$$I_{max} = \partial_{Al+Steel} \cdot S_c = 807,42 [A]$$

Y el número de cables que se obtiene de la relación de la intensidad máxima y la intensidad admisible será:

$$N^o \text{ conductores} = \frac{I_{max}}{I_{admisible}} = \frac{807,42}{710} = 1,1372 \sim 2$$

4.3.2.Cálculo de la intensidad máxima admisible a través del balance térmico

El balance térmico consiste en que el calor generado es el mismo que el calor evacuado

$$Q_{gen} = Q_{eva} \quad (31)$$

- El calor generado puede originarse en distintos focos:
 - ✓ Efecto Joule (P_J)
 - ✓ Flujo magnético en el interior del conductor (Q_M)

$$P_J + Q_M = I^2 \cdot R_{cc\theta} (1 + \alpha \cdot (\theta - 20)) \quad (32)$$

donde:

- θ : temperatura máxima del conductor (85 °C)

- ✓ Radiación solar incidente (Q_S)

$$Q_S = \beta \cdot \Psi \cdot D \quad (33)$$

donde:

- β : coeficiente de absorción del conductor (0,5).
- Ψ : radiación solar de la zona en W/m².
- D : diámetro del conductor en m.

- El calor evacuado puede tener origen en:
 - ✓ Convección (Q_C)

$$\begin{cases} Q_{c1} = [1,01 + 11,27(dV)^{0,52}] \cdot 0,02723(\theta - \theta_a) \\ Q_{c2} = 0,23714(dV)^{0,6}(\theta - \theta_a) \\ Q_c = MAX(Q_{c1}, Q_{c2}) \end{cases} \quad (34)$$

donde:

- V : Velocidad del viento
- d : diámetro del conductor en mm.
- θ_a : temperatura ambiente

✓ Radiación (Q_r)

$$Q_R = \epsilon \sigma \pi D (\theta^4 - \theta_a^4) \quad (35)$$

donde:

- ϵ : factor de emisividad de radiación (0,5)
- σ : constante de Stefan-Boltzmann ($5,66961 \cdot 10^{-8}$ [W/(m²K⁴)]).

Se supone el calor generado por efecto corona y el calor evacuado por evaporación despreciables.

Considerando los datos del ANEXO I obtenidos de estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio, se realizará un estudio con los valores máximos y medios de temperatura, velocidad de viento y radiación.

	Q_s [W/m]	Q_c [W/m]	Q_r [W/m]	I_{\max} [A]	Nº conductores
Valores máximos	13,527	649,447	16,613	2858,672	2
Valores medios	3,173	533,933	22,945	2633,311	2

Tabla 45. Balance térmico

En todos los cálculos realizados se ha podido comprobar que sólo son necesarios dos conductores por fase. Esta comprobación también se puede observar en la Tabla 45.

4.4. Caída de tensión.

A través de la relación que existe entre la caída de tensión del cable y la tensión nominal, mediante el circuito equivalente, se obtiene el valor relativo de la caída de tensión con la expresión (36)

$$\Delta V_{\%} = \frac{\frac{S}{\cos \varphi} \cdot (R_{ca} + jX_a \cdot \tan \varphi)}{V_R^2} \cdot 100 \quad (36)$$

La relación entre el factor de potencia y la caída de tensión se muestra en la Ilustración 13:

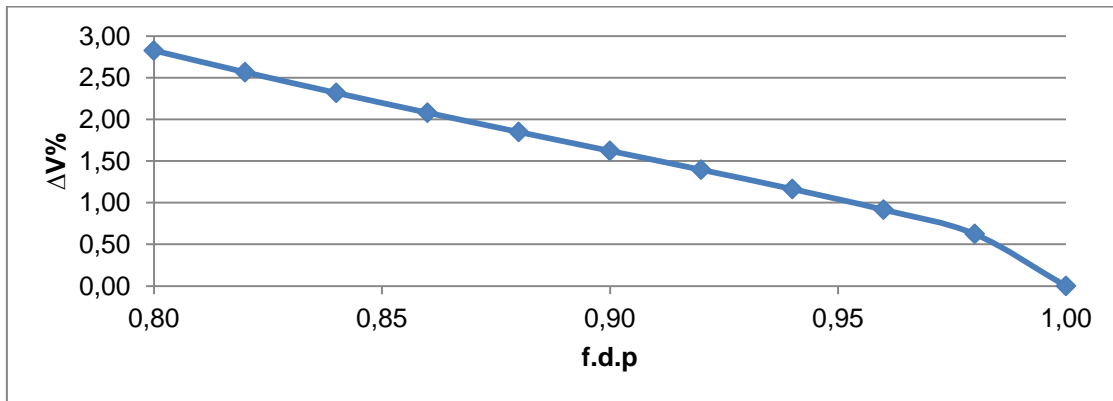


Ilustración 13. f.d.p frente a caída de tensión

La línea se encuentra dentro de los valores admisibles de caída de tensión puesto que la tensión se ha limitado en torno al 5% de la tensión máxima, por lo que no se verá comprometida la continuidad del suministro.

4.5. Pérdidas de potencia

4.5.1. Efecto Joule

Se calcula el porcentaje de las pérdidas de potencia relacionando las pérdidas de potencia por Efecto Joule y la potencia nominal.

$$\Delta P_{\%} = \frac{3 \cdot I^2 \cdot R_{\theta}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi} \cdot 100 \quad (37)$$

En la Ilustración 14 se representa la pérdida de potencia para diferentes factores de potencia. Como se observa no supera el 3% por lo que no habrá pérdidas de potencia por efecto Joule.

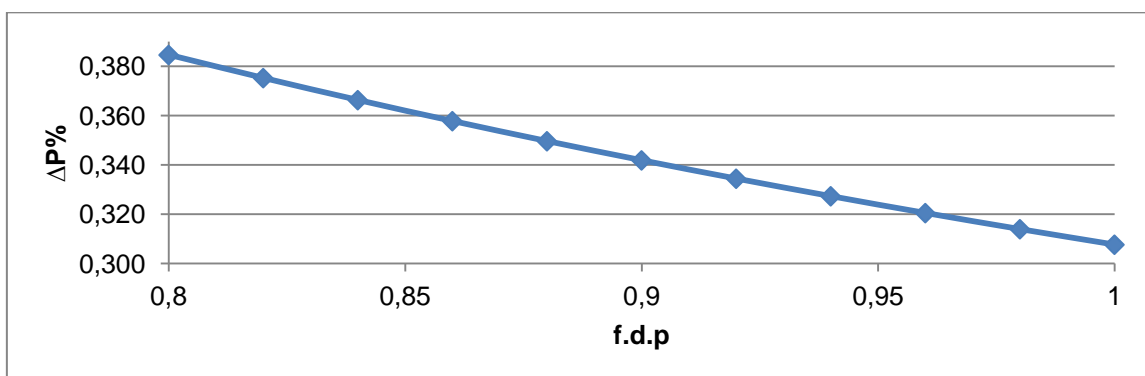


Ilustración 14. f.d.p frente a pérdidas de potencia por efecto Joule

4.5.2.Efecto Corona

Se ha realizado un estudio de efecto corona puesto que en el ITC-LAT-07 del RLAT[6] se especifica que se debe considerar este fenómeno para líneas mayores de 66kV.

Para saber si existe efecto corona, primero, hay que calcular la tensión crítica de descarga obtenida mediante la fórmula de Peek (38), para posteriormente ser comparados con los valores nominales de tensión

$$U_d = \sqrt{3} \cdot 21,1 \cdot m_d \cdot m_t \cdot \delta \cdot \frac{r}{\beta} \cdot \ln \frac{DMGff}{r} \quad (38)$$

donde:

- r , radio del conductor [cm].
- m_d , coeficiente rugosidad del conductor. Para conductores formados por hilos, el coeficiente de rugosidad se encuentra entre los valores 0,83 y 0,87, por tanto, se usará un $m_d = 0,85$.
- m_t , coeficiente meteorológico. Se harán dos cálculos diferentes considerando un tiempo húmedo con un $m_t = 0,8$ y un tiempo seco con $m_t = 1$.
- δ , factor de corrección del aire.

$$\delta = \frac{3,921 \cdot h}{273 + \theta} \quad (39)$$

Siendo $h = 76 \cdot 10^{-y/18,4}$, considerando y como la altura sobre el nivel del mar [km]. La temperatura se cogerá como la temperatura máxima y mínima dentro de la localización de estudio expuestas en el ANEXO I

- β , factor de n conductores por fase

$$\beta = \frac{1 + (n - 1) \cdot r/R_H}{n} \quad (40)$$

donde $R_H = \frac{r_c}{2} \cdot \sin \frac{\pi}{n}$

A continuación, se representan las tensiones obtenidas por efecto corona en tiempo húmedo y seco y a las temperaturas máximas y mínimas que se encuentran en el ANEXO I. En la Ilustración 15, se relacionan estas tensiones con la tensión nominal y la tensión más elevada de la red.

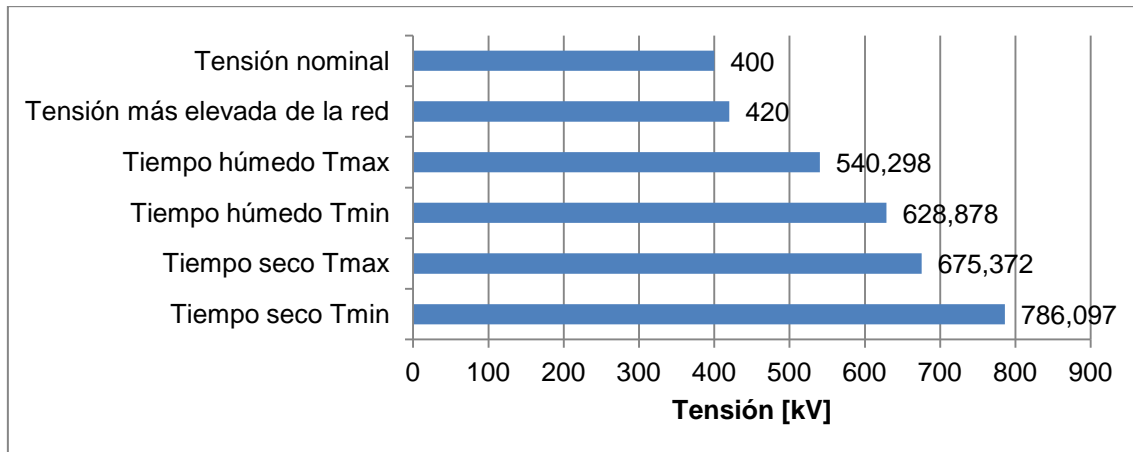


Ilustración 15. Relación de las tensiones por efecto corona.

Como las tensiones por efecto corona son superiores a la tensión nominal y la tensión más elevada de la red se puede decir que no habrá pérdidas por efecto corona.

Capítulo 5. Impacto ambiental

5.1. Recopilación de información sobre la zona de estudio

En esta sección se realizan los estudios necesarios para obtener la información con la que se analizará el impacto ambiental de la línea sobre la zona.

Los estudios que se realizarán serán los siguientes:

1. Estudio demográfico
2. Estudio urbanístico
3. Estudio paisajístico
4. Estudio de la flora y fauna
5. Estudio de los campos electromagnéticos.

5.1.1. Estudio demográfico

La zona representativa para este estudio es el municipio de Arroyomolinos puesto que su población ha aumentado significativamente en los últimos años. El Padrón municipal de Arroyomolinos registró en 2018 un total de 30.052 personas y tan sólo diez años antes la población era de 11.804. Esta subida es debido al gran número de viviendas de nueva construcción en esta zona.

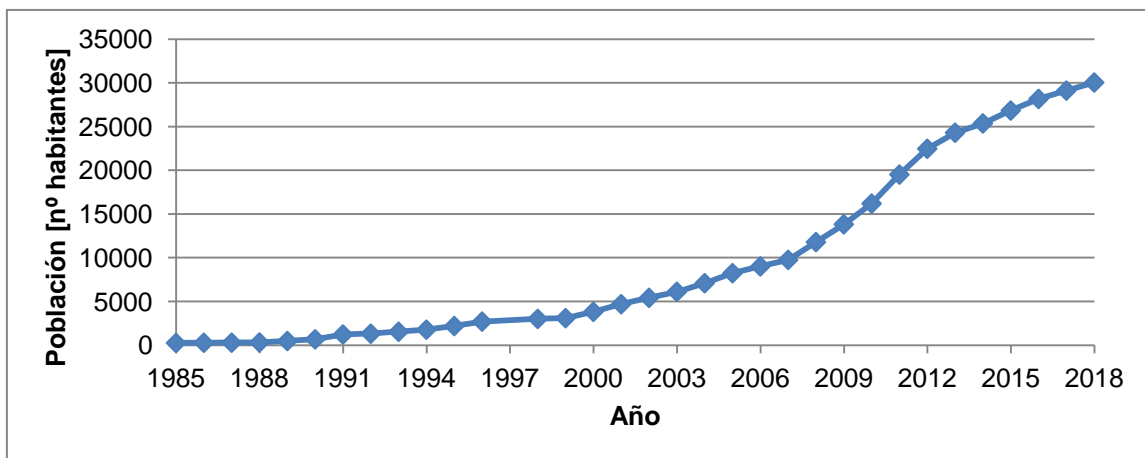


Ilustración 16. Evolución de la población empadronada en Arroyomolinos [9]

En la Ilustración 17 se puede observar que el municipio de Arroyomolinos tiene una población joven, ya que una gran parte de la población se concentra entre las edades de 0 y 19 años. Además, se puede ver una notable disminución de la población para edades superiores de 55. La edad media de la población en este municipio es de 31 años.

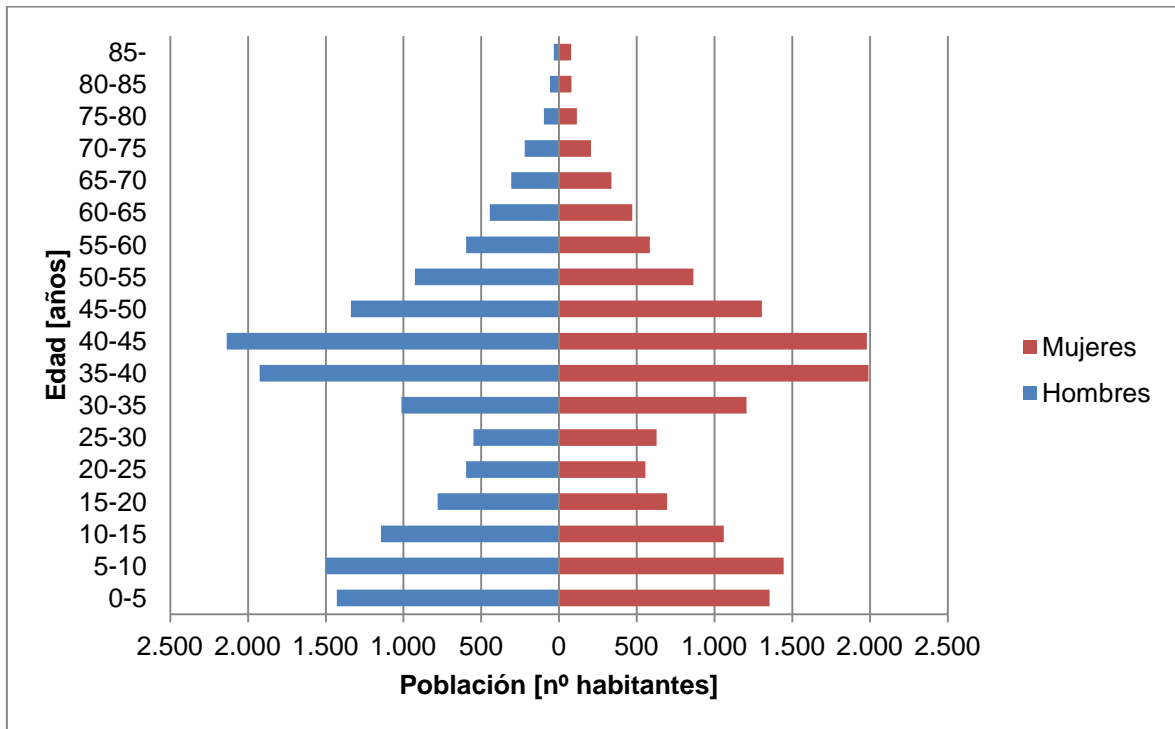


Ilustración 17. Pirámide de población de Arroyomolinos[10]

5.1.2. Estudio urbanístico

El planteamiento urbanístico de las zonas de Arroyomolinos y Móstoles se rige por el P.G.O.U [11]. La ley de Suelo del Real Decreto Legislativo 7/2015, del 30 de octubre divide el suelo en tres grandes grupos:

El **suelo urbano** se divide en consolidado y no consolidado, la diferencia entre ambos es que el segundo tipo se caracteriza por ser parcelas en la que quedan por completar equipamiento urbano o son necesarias la renovación de los ya existentes.

Existen dos tipos de **suelo urbanizable**, el sectorizado y el no sectorizado, cuya diferencia principal es que el suelo sectorizado se prevé su urbanización en un corto periodo de tiempo, sin embargo, el no sectorizado no está previsto su urbanización a corto ni medio plazo.

El **suelo no urbanizable** es aquel que nunca se podrá convertir en suelo urbano porque está calificado como zona protegida.

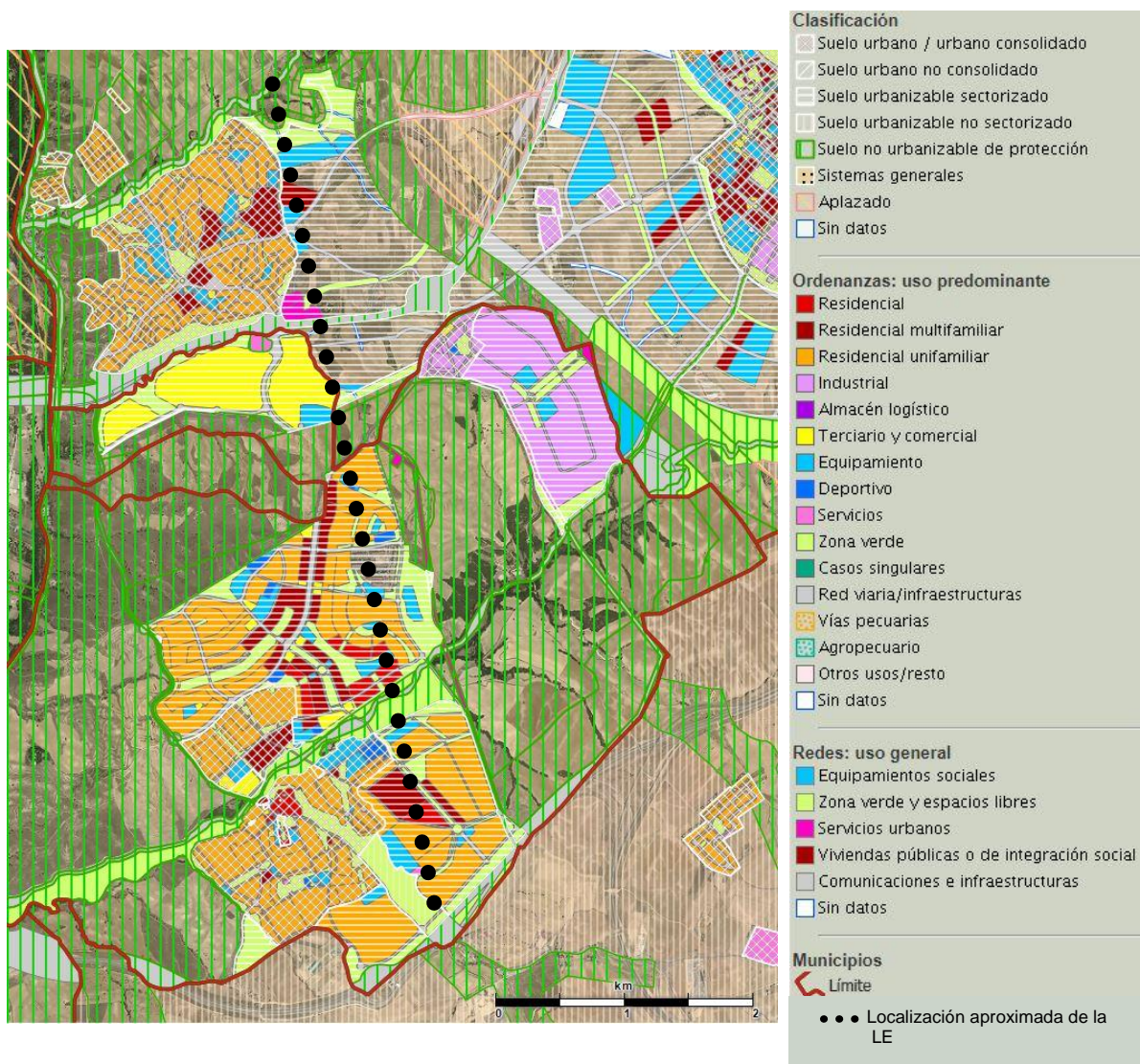


Ilustración 18. Planteamiento urbanístico. Visor SIT [12]

Como se puede observar en la Ilustración 18, la línea transcurre por zona de suelo urbanizable sectorizado y suelo urbanizable de protección. Actualmente la zona de Arroyomolinos está en expansión, aumentando la construcción de nueva vivienda.

La línea transcurre principalmente por zonas residenciales, en su mayoría zonas residenciales multifamiliares

5.1.3. Estudio paisajístico

En las limitaciones de la zona de estudio se encuentra el *Parque Regional curso medio del río Guadarrama y su entorno*, considerado como zona protegida.

La *Cuenca del río Guadarrama* forma parte de la Red Natura 2000 [13], con una calificación de ZEC (Zona Especial de Conservación) por el Decreto 105/2014 para esta zona. El hábitat de los espacios protegidos que estén dentro de este Plan Europeo debe de ser protegidos y mantenidos para conservar la fauna y flora del lugar.

La ZEC de la *Cuenca del río Guadarrama* tiene una extensión de 33.945ha y corresponde con aproximadamente un 4% de la superficie total de la Comunidad de Madrid.

Como se puede observar en la Ilustración 19, del río Guadarrama, que bordea la zona urbana, nacen varios afluentes que atraviesan la zona de estudio, los más importante son el Arroyo de la Arroyada que divide la zona urbana de Arroyomolinos en dos y Arroyo del Soto que colinda con la zona norte de Móstoles. Ambos arroyos hacen que se extienda el Espacio Natural Protegido pasando por la zona del trascurso de la línea.

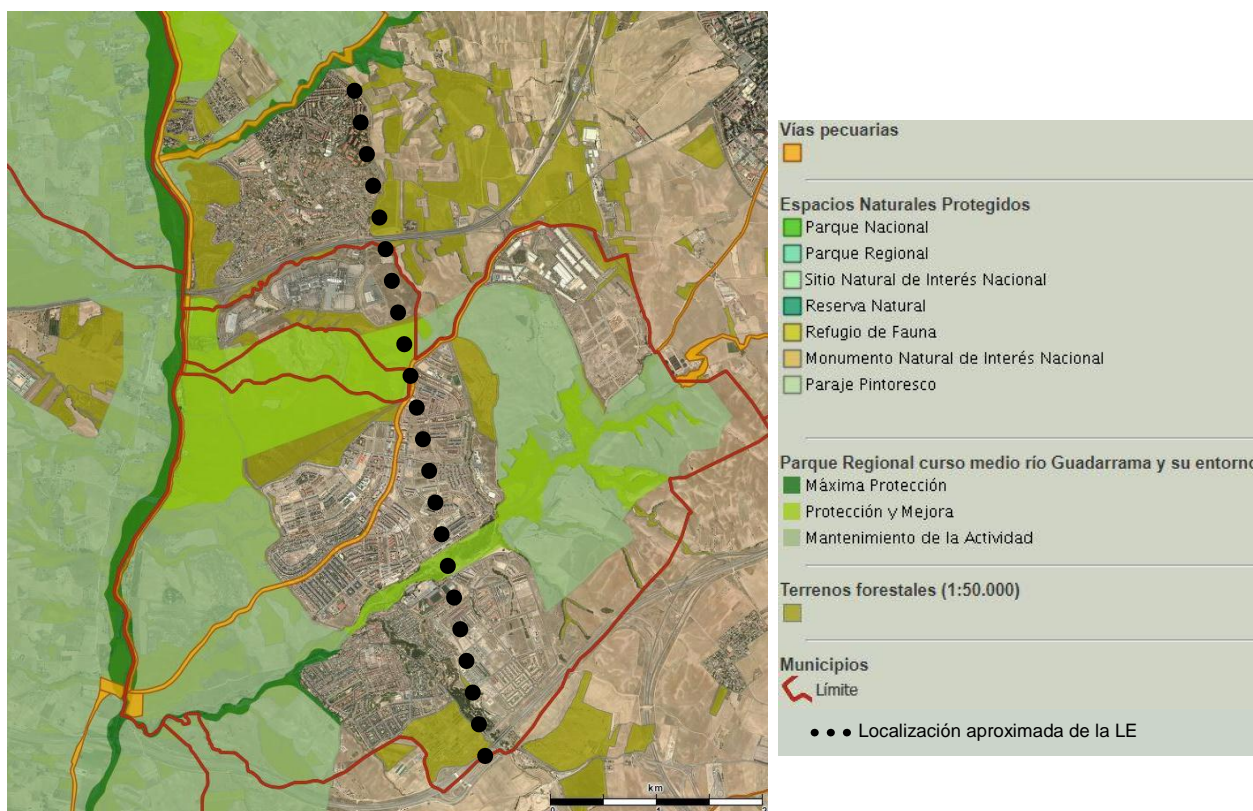


Ilustración 19. Espacios naturales protegidos. Visor SIT [12]

Además, cabe destacar la existencia de vías pecuarias en la zona de estudio, como la del Cordel de Arroyomolinos o el Camino de San Marcos en Móstoles.

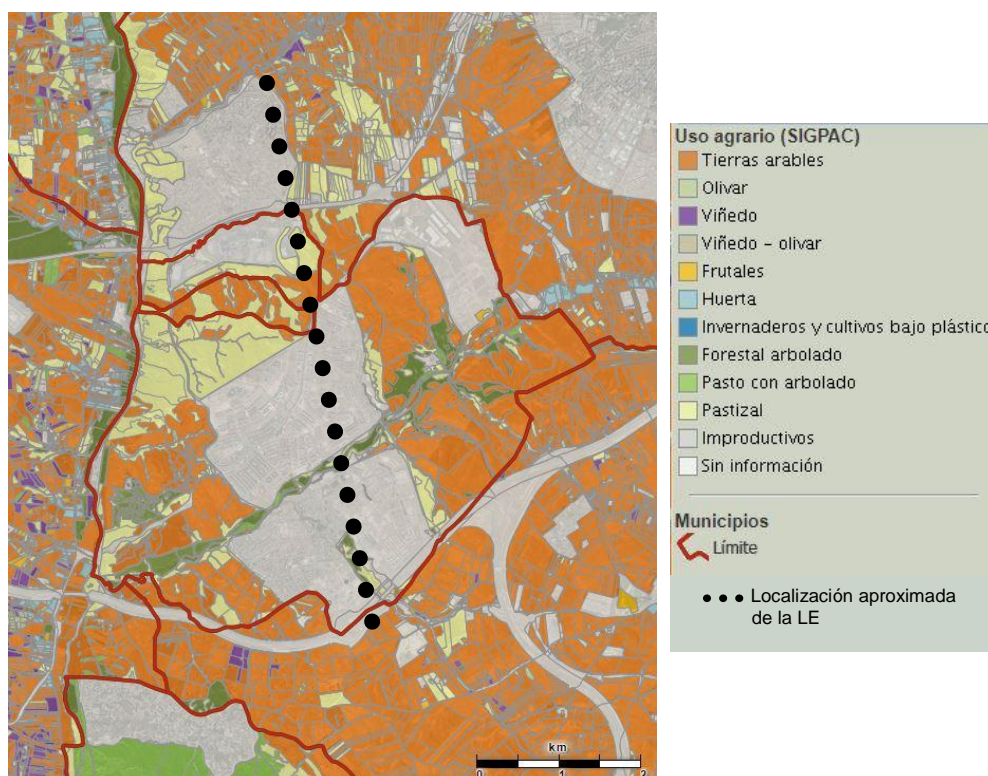


Ilustración 20. Uso agrario del terreno. Visor SIT [12]

La mayor parte del terreno de los alrededores de las zonas urbanas son tierras arables, con posibilidad de cultivar avena, trigo y centeno, también abunda el pastizal y algún cultivo de vides.

5.1.4. Estudio de la flora y fauna

Tanto Arroyomolinos como Móstoles son parte de los municipios donde transcurre el *Parque Regional curso medio río Guadarrama* [14, 15] por tanto se encontrarán flora y fauna característica de esta zona protegida.

En el paisaje de esta zona prima el suelo árido con arboles como los chopos, olmos, sauces, encinas y olivos. Además de vegetación silvestre como la manzanilla bastarda, amapola, cantueso y retama.

Los animales terrestres más comunes que se pueden encontrar son: conejo, zorro, jabalí, sapos, ratón común y culebras.

Se hará un estudio concreto de las aves que habitan en esta zona puesto que es la especie con mayor riesgo frente a las líneas de tensión. Las aves más comunes son:

- Cigüeña
- Golondrinas
- Perdiz
- Murciélago
- Calandria
- Avutarda
- Jilguero

- Urraca
- Mochuelo
- Alondra
- Abubilla
- Aguilucho cenizo
- Águila imperial

5.1.5. Estudio de los campos electromagnéticos de una línea eléctrica.

Según la OMS [16], los efectos que tienen los campos electromagnéticos en el cuerpo humano se podrán medir debido a tres variables: la frecuencia o longitud de onda, la distancia del organismo al foco que produce los campos electromagnéticos y la intensidad o tensión que provoca el campo magnético o el campo eléctrico.

Por tanto, el caso más peligroso para un campo electromagnético se da cuando la frecuencia es alta, la distancia al foco es baja y la intensidad o tensión alta. Las ondas de las líneas de alta tensión son de frecuencias bajas, sin embargo, la intensidad y la tensión son altas, por tanto, se deberá ver cuando una línea eléctrica no supone un peligro.

En la Ilustración 21 se observa cómo influyen los campos electromagnéticos en el individuo. Los campos eléctricos producen una corriente que atraviesa el organismo hasta el suelo y los campos magnéticos producen corrientes inducidas dentro del cuerpo.

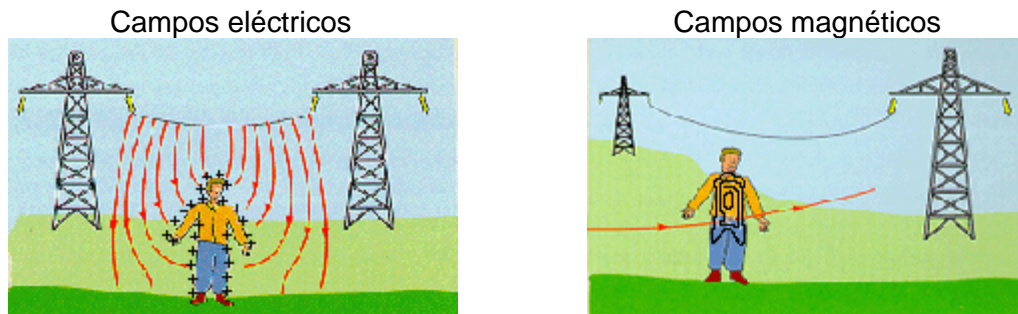


Ilustración 21. Campos electromagnéticos en el organismo [16]

El ICNIRP [16] establece que el límite de exposición a campos magnéticos, con frecuencias de 50 Hz, es de $100\mu\text{T}$ y 5kV/m a campos eléctricos. Este límite no es superado por las líneas de 400kV , cuyos valores son de entre $0,1\text{-}3,0\mu\text{T}$ y $0,2\text{-}2,0\text{kV/m}$ a una distancia de 30m según AEEIA [17], por lo que se considera que no existirán riesgos en la salud si se produce una exposición prolongada a estos campos magnéticos y eléctricos.

Capítulo 6. Impacto socio-económico y modificaciones de la línea

Una vez realizados los estudios necesarios, se pasa a evaluar los posibles impactos generados por la línea y qué posibles modificaciones se pueden realizar para mejorar los efectos en diferentes aspectos aquí estudiados.

6.1. Impacto medioambiental

El impacto visual de la línea es notable puesto que transcurre por zonas urbanas y por zonas protegidas, teniendo gran sensibilidad visual en zonas de las inmediaciones del *Parque Regional del río Guadarrama* y en las vías pecuarias existentes en la zona.

En las regiones en las que la línea transcurre por zonas protegidas pertenecientes al *Parque Regional del río Guadarrama* no sólo existe impacto visual, también un impacto sobre la flora y fauna del lugar.

Las líneas alteran el hábitat de los animales. Las aves son la especie que más impacto reciben, pueden sufrir electrocuciones por colisión. Las aves grandes como las águilas pueden hacer contacto con dos fases al mismo tiempo mientras vuelan o especies como la cigüeña pueden anidar en lo alto de los apoyos. Además, existe el riesgo de rotura por el peso de las aves cuando se concentran en los conductores.

La existencia de líneas de alta tensión cerca de arboledas hace que esta zona sufra riesgo de incendios si no se realiza un mantenimiento adecuado de los árboles cercanos a la línea.

6.2. Impacto social y económico

Existen diversos aspectos que preocupan a la sociedad cuando existe población que vive cerca del trazado de líneas de alta tensión. Esto es debido a que comúnmente se asocian los campos electromagnéticos con posibles enfermedades como el cáncer, depresión, efectos sobre el embarazo, hipersensibilidad, etc. Es por ello que los ayuntamientos ven necesario alejar estos apoyos de alta tensión fuera de estos núcleos urbanos.

Se ha demostrado que no existe efecto corona en los cálculos técnicos de la línea, por lo que no habrá grandes niveles de ruido. Se podrá escuchar un zumbido en las inmediaciones de la línea cuando exista sobrecarga o cuando las condiciones atmosféricas sean desfavorables, por tanto, para las viviendas que se encuentran cerca de los apoyos esto puede llegar a ser un problema. Además, si se produce efecto corona debido a unas condiciones ambientales desfavorables o a una sobretensión, se pueden producir liberaciones de gases nocivos para la salud como el ozono troposférico o el radón.

La negativa social afecta a la inversión que se realice en vivienda y construcción de zonas públicas por lo que se pueden producir devaluaciones del terreno y la vivienda

También puede suponer un problema la explotación de los terrenos agrícolas cercanos a los apoyos, por lo que se desaprovechará terreno de cultivo.

6.3.Modificaciones

Según lo descrito anteriormente sobre el impacto medioambiental, social y económico, se han analizado dos posibles modificaciones sobre el trazado y tipo de línea.

Modificación 1	Modificación 2
Soterramiento de la línea y cambio de trazado	Cambio del trazado de la línea aérea

Tabla 46. Modificaciones

6.3.1.Modificación 1

La **modificación 1** se basa en el soterramiento de la línea y en el nuevo trazado que se ha marcado en la Ilustración 23. Será una línea subterránea tipo sifón puesto que ambos extremos de la línea subterránea se conectan a líneas eléctricas aéreas.

Soterrando la línea se consigue que los campos eléctricos sean despreciables en superficie y los campos magnéticos se puedan evitar colocando materiales conductores entre el cable y la superficie.

Se ha elegido ese trazado puesto que es una de las opciones con menor impacto ambiental en la fase de construcción, ya que el terreno es urbanizable no sectorizado en su gran mayoría. La longitud total de línea subterránea en el nuevo trazado es de aproximadamente 10 km.

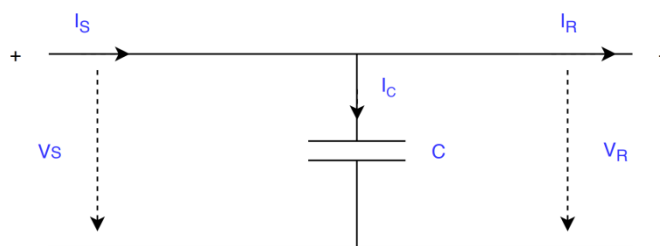


Ilustración 22. Circuito equivalente línea subterránea

En la Ilustración 22 se muestra el circuito equivalente de la línea subterránea. Se desprecia la resistencia y la inductancia al ser mucho menores que la capacidad de la línea. La *longitud crítica* es la longitud mínima del cable, a partir de la cual, toda la intensidad generada será consumida por la corriente capacitiva de la línea.

La distancia del nuevo trazado es aceptable debido a que es menor a la *longitud crítica* para líneas subterráneas de 400kV establecida en la Tabla 6.1 en el Cálculo de líneas subterráneas de alta tensión [8] donde se marca como *longitud crítica* 62 km para una línea de estas características.

Por último, se verán las ventajas y desventajas de esta modificación.

- Ventajas:
 - Reducción del impacto visual
 - Posibilidad de aumentar la zona urbana y la construcción de nuevas viviendas en las localidades cercanas.

- Desventajas:
 - Mayor coste de obra
 - Mayor impacto ambiental en la fase de construcción
 - Mayor dificultad para encontrar las averías

6.3.2.Modificación 2

La **modificación 2** consiste en cambiar el emplazamiento de la línea eléctrica ya existente. Se ha elegido de nuevo el trazado expuesto en la Ilustración 23 debido a su bajo impacto ambiental, ya que el nuevo diseño se lleva a cabo alejado de zonas urbanas y de la zona protegida de la cuenca del río Guadarrama.

Las ventajas y desventajas de esta propuesta son las siguientes:

- Ventajas:
 - Menor coste de obra
 - Mayor facilidad de mantenimiento de la instalación
- Desventajas:
 - Mayor impacto visual
 - Impacto en la avifauna
 - Instalación menos aceptada socialmente.

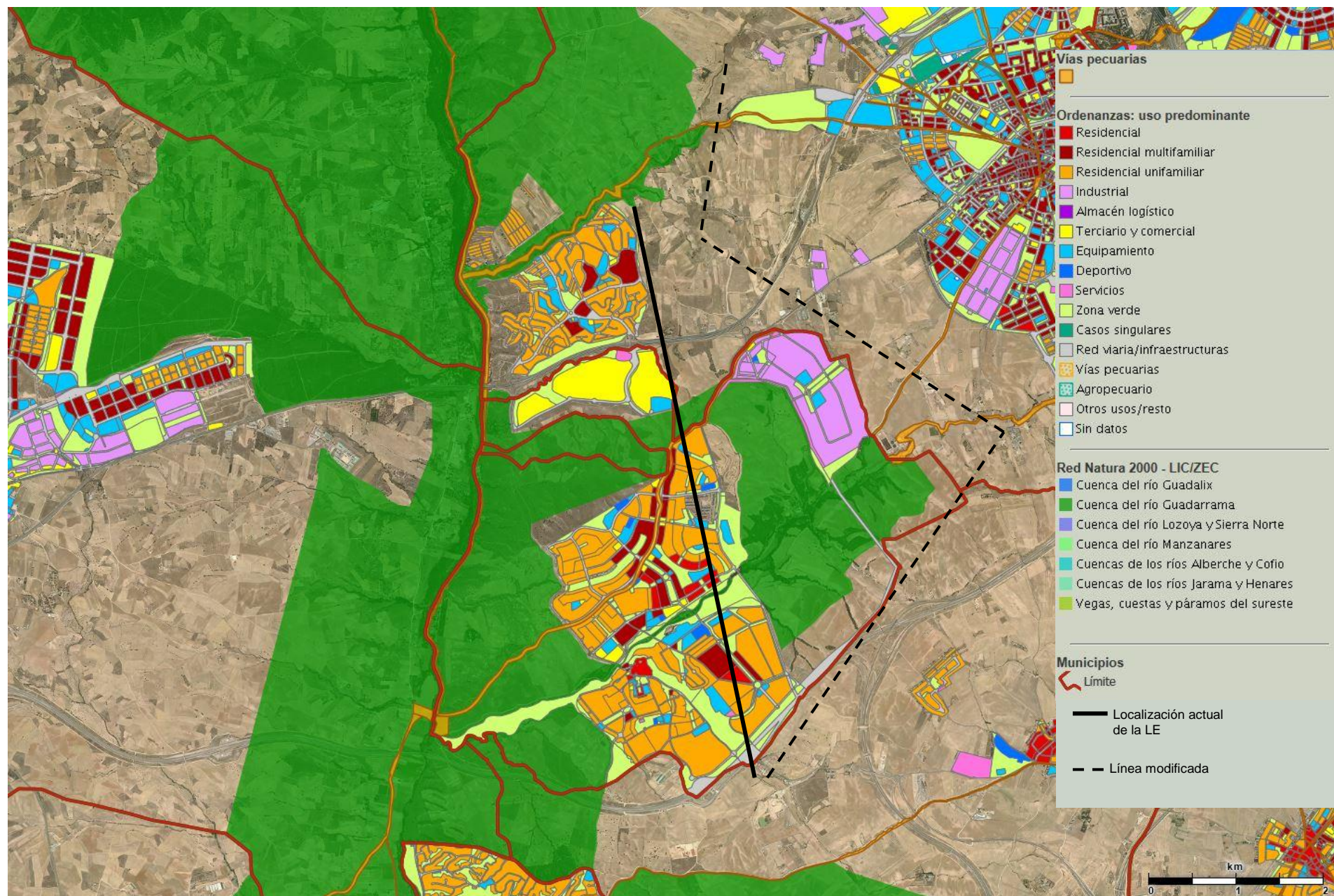


Ilustración 23. Modificación de la línea. Visor SIT [12]

Capítulo 7. Presupuesto

El presupuesto se centrará en la inversión realizada para llevar a cabo esta memoria y realización de los estudios oportunos para obtener datos clarificadores sobre la línea eléctrica objeto de este análisis.

7.1. Recursos humanos

Se realizará el presupuesto de acuerdo con la mano de obra ingenieril necesaria

Nº de personas	Horas	Coste [€/h]	Presupuesto total [€]
1	300	20	6000

Tabla 47. Presupuesto. Recursos humanos.

7.2. Recursos materiales

El material necesario para este estudio ha sido:

Material necesario	Concepto	Coste total [€]
Ordenador	Ordenador portátil HP 15 Intel Core i5	699,99
Documentación	Libros, Reglamentación, etc.	60
Material de oficina	Cuadernos, bolígrafos, lapiceros, folios, etc.	20
Conexión internet	Fibra óptica Movistar	46
Total		825,99

Tabla 48. Presupuesto. Recursos materiales

7.3. Presupuesto final

A continuación, se presenta el presupuesto final:

Recursos humanos	6000 €
Recursos materiales	825,99 €
Total	6825,99€

Tabla 49. Presupuesto final

Capítulo 8. Conclusiones y posibles estudios futuros

La resolución de este estudio se basa en analizar los resultados obtenidos en los cálculos e implicaciones ambientales, de la línea eléctrica de 400 kV, que transcurre entre Villaviciosa de Odón y Morata, haciendo principal énfasis en las localidades de Arroyomolinos y Móstoles. Estas dos regiones se encuentran perjudicadas directamente por la situación de la línea.

En los cálculos mecánicos podemos concluir que, con los apoyos elegidos, las distancias de seguridad están dentro de los parámetros marcados por la norma. Las flechas calculadas son tales que en todos los cantones se respeta la distancia de seguridad.

Con los resultados de los cálculos eléctricos se puede concluir que no existen pérdidas por efecto corona por lo que no se producirán ruidos en las inmediaciones de la línea. También se ha podido demostrar una buena continuidad de suministro debido a que la caída de tensión está dentro de los valores admisibles.

En cuanto a las conclusiones que se pueden obtener del estudio de impacto social son que, debido al aumento de la densidad de población, las viviendas de nueva construcción están cerca de los apoyos de la línea. Debido a esto, los habitantes de estos lugares apoyan la iniciativa de que se reubique el trazado de la línea por otro lugar con menores implicaciones sociales y ambientales.

Cabe destacar que la línea, a su paso por el sur de Arroyomolinos, cruza por zona protegida perteneciente al *Parque Regional del curso medio del río Guadarrama y su entorno*, por lo que algunas especies de aves se pueden encontrar en riesgo al situarse la línea tan cerca de esta zona.

La situación actual de la línea implica un gran impacto visual, esto sumado a la idea social negativa que existe debido a los campos electromagnéticos, hace que la inversión en vivienda en estas zonas pueda llegar a ser un problema.

Con todos estos resultados se plantean dos posibles modificaciones que servirán para disminuir el impacto visual, el impacto social y ambiental que actualmente presenta la localización de línea. La primera opción es la de soterrar la línea por un nuevo trazado, mejorando así el impacto visual y el impacto ambiental y social. La segunda opción se refiere a construir una línea aérea cambiando la localización actual a una con menor impacto social y ambiental.

Cuando se haya entregado a los ayuntamientos competentes los estudios técnicos realizados en esta memoria, los impactos ambientales obtenidos y las modificaciones planteadas, se pueden realizar unos estudios posteriores explicados a continuación.

Uno de los posibles estudios a realizar es el análisis del medio para concluir cuál de las dos modificaciones propuestas es la más acertada.

Una vez elegido qué tipo de modificación se va a realizar, se deben de llevar a cabo los cálculos técnicos del proyecto.

Por último, dentro de este proyecto de modificaciones de la línea, se debería realizar el estudio de impacto ambiental y observar cuales son las diferencias con el análisis de impacto ambiental planteado en esta memoria.

ANEXO I

Los **datos de temperatura y viento** [18] para la zona de estudio son los siguientes:

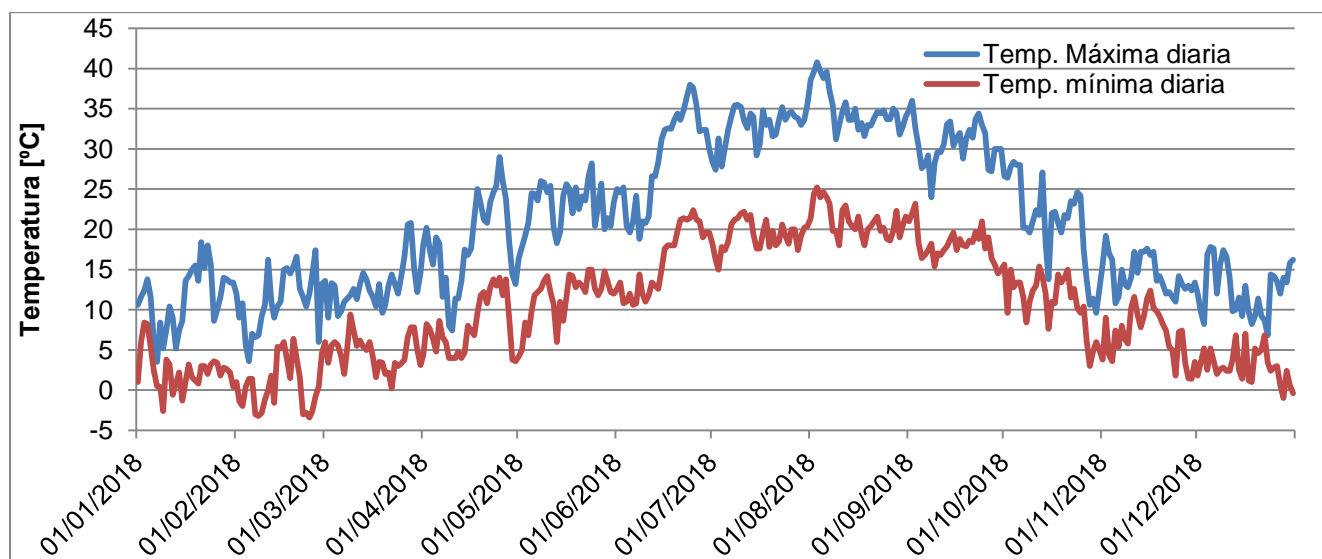


Ilustración A1. Temperatura. Estación meteorológica de Getafe

- Temperatura máxima: 40,80 °C
- Temperatura media: 17,60 °C
- Temperatura mínima: -3,4 °C

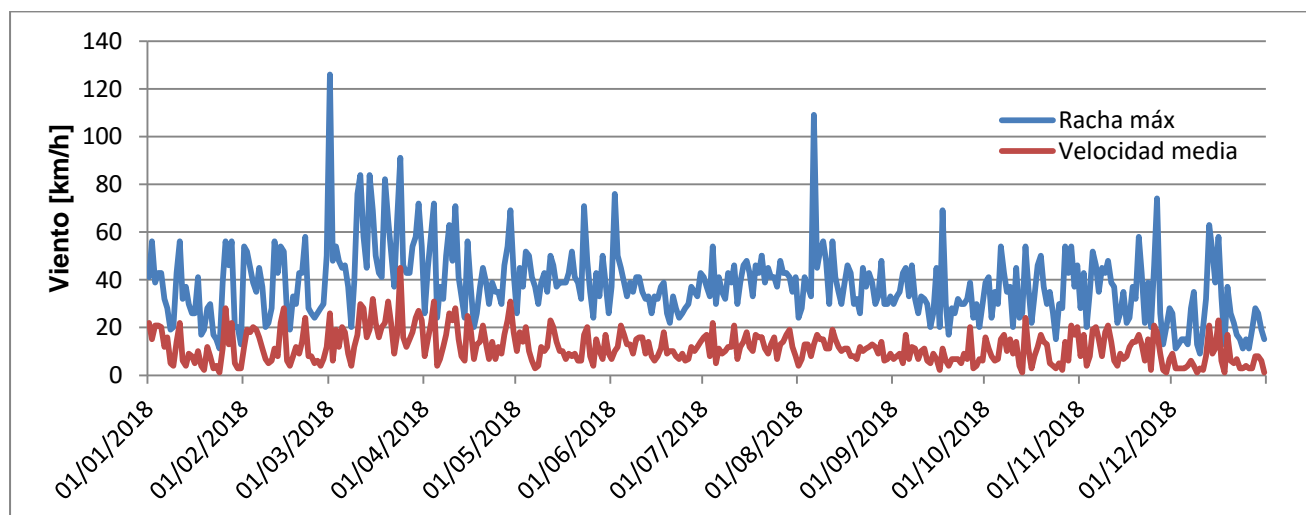


Ilustración A2. Viento. Estación meteorológica de Getafe

- Velocidad máxima: 126 km/h (35 m/s)
- Velocidad media: 45 km/h (12,5 m/s)

Los datos de **radiación solar** [19, 20] para esta zona son los siguientes:

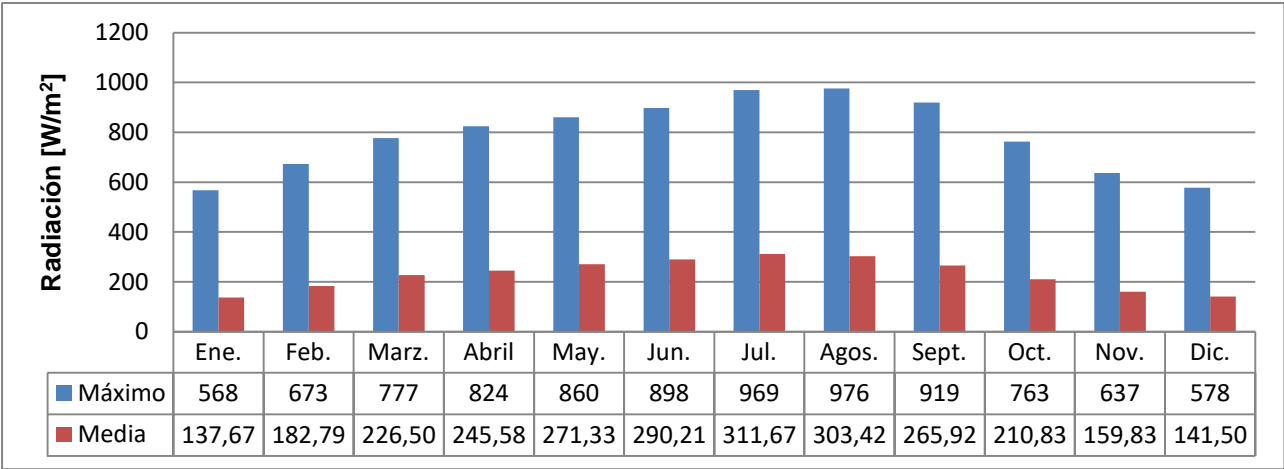


Ilustración A3. Radiación. Arroyomolinos

- Radiación máxima: $976\ W/m^2$
- Radiación media: $228,94\ W/m^2$

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, *BOE núm. 174*, Lunes 20 de julio de 2009.
- [2] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, *BOE núm. 176*, Martes 24 de julio de 2012.
- [3] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, *BOE núm. 98*, Viernes 24 de abril de 2015.
- [4] Ministerio de Administraciones Públicas, *BOCM núm. 160*, Miércoles 8 de Julio de 2009.
- [5] IMEDEXSA, *Catálogo general*, 2009.
- [6] VV.AA, RLAT. Reglamento de Líneas Eléctricas de Alta Tensión, Madrid: Garceta Grupo Editorial, 2009.
- [7] SAPREM, *Separadores Amortiguadores*.
- [8] F. G. V. J. M. M. A. G. S. Pascual Simón, CÁLCULO Y DISEÑO DE LÍNEAS ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN. Aplicación al Reglamento de Líneas de Alta Tensión (RLAT), Madrid: IBERGACETAPUBLICACIONES, S.L., 2011.
- [9] Instituto Nacional de Estadística, «INEbase - Demografía y población - Padrón. Población por municipios,» [En línea]. Available: <https://www.ine.es/>.
- [10] C. d. Madrid, «Arroyomolinos - Comunidad de Madrid,» [En línea]. Available: <http://www.comunidad.madrid/centros/arroyomolinos>. [Último acceso: Abril 2019].
- [11] Área de Gobierno de Urbanismo y Vivienda, «Plan General de Ordenación Urbana de Madrid - Compendio de las normas urbanísticas,» Madrid, 2009.
- [12] Comunidad de Madrid, «Planeamiento - Comunidad de Madrid,» [En línea]. Available: <http://www.madrid.org/cartografia/sitcm/html/visor.htm>. [Último acceso: 24 Abril 2019].
- [13] D.G. de Agricultura, Ganadería y Alimentación. Comunidad de Madrid, «Contribución del Programa de Desarrollo Rural de la Comunidad de Madrid 2014-2020. Anexo PDR Red Natura 2000,» Madrid, 2017.

- [14] Comunidad de Madrid, «Parque Regional del curso Medio del río Guadarrama y su entorno,» [En línea]. Available: <http://www.comunidad.madrid>. [Último acceso: 30 Abril 2019].
- [15] Ayto. Arroyomolinos, «Parque Regional del Guadarrama,» [En línea]. Available: <https://www.ayto-arroyomolinos.org/el-municipio/parque-regional-del-curso-medio-del-rio-guadarrama>. [Último acceso: Mayo 2019].
- [16] Organización Mundial de la Salud, «¿Qué son los campos electromagnéticos?,» [En línea]. Available: <https://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/es/index1.html> . [Último acceso: Mayo 2019].
- [17] J. M. P. G. A. M. Ramon Folch, EL TRANSPORTE ELÉCTRICO Y SU IMPACTO AMBIENTAL. Reflexiones y propuestas para la mejora de la evaluación ambiental., Madrid: Asociación Española de Evaluación de Impacto Ambiental, 2012.
- [18] Agencia Estatal de Meteorología, «Datos Abiertos - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España,» [En línea]. Available: http://www.aemet.es/es/datos_abiertos. [Último acceso: Marzo 2019].
- [19] R. M. A. G. Thomas Huld, A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa, 2012.
- [20] Europe Comission, «JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS),» 21 Septiembre 2017. [En línea]. Available: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP. [Último acceso: Marzo 2019].
- [21] Goolge , «Mapa de Arroyomolinos,» Google Maps, [En línea]. Available: <https://www.google.com/maps/place/28939+Arroyomolinos,>. [Último acceso: Enero 2019].
- [22] Google, «Mapa Parque Coimbra (Móstoles),» Google Maps, [En línea]. Available: <https://www.google.com/maps/place/28935+Parque+Coimbra>. [Último acceso: Enero 2019].

